

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS DE  
SOLVENTES EN LA EMPRESA GOLDEN FLEX S.A.**

**LIZETH CATHERINE ARIAS ARIAS  
MARÍA ALEJANDRA TAMAYO LEÓN**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2017**

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS DE  
SOLVENTES EN LA EMPRESA GOLDEN FLEX S.A.**

**LIZETH CATHERINE ARIAS ARIAS  
MARÍA ALEJANDRA TAMAYO LEÓN**

**Proyecto integral de grado para optar al título de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director  
GERMÁN LÓPEZ MOLINA  
Ingeniero Mecánico.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2017**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Ing. Edgar Fernando Moreno  
Presidente del Jurado

---

Ing. Felipe Correa Mahecha  
Jurado 1

---

Ing. Jaime Arturo Calvache  
Jurado 2

Bogotá D.C. ,23 de Agosto de 2017

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Jaime Posada Díaz**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

**Dra. Ana Josefa Herrera Vargas**

Secretario General.

**Dr. Juan Carlos Posada Garcia-Peña**

Decano de Facultad de ingenierías

**Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi**

Director Programa Ingeniería Química

**Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto,  
además de su infinita bondad y amor.  
A mis padres Antonio Arias y Ana Lucía Arias por brindarme su apoyo a lo largo de  
este trayecto, por ser ejemplos de perseverancia y constancia.  
A mis hermanos Diego, Javier y Alejo por estar siempre conmigo y apoyarme.  
A mi tía Cecy y María, mi prima Lina María por su apoyo en todo momento y por  
sus consejos.  
A mis amigas Alejandra T., Angie V, Alejandra C., Diana S., Vianey, Diana A. y  
Jaime por su compañía en momentos buenos y malos y la motivación constante*

**Lizeth Catherine Arias Arias**

*Dedico este logro primero a Dios por la sabiduría, la fortaleza y su presencia para  
culminar la carrera.  
A mis padres Blanca Cecilia León y Jorge Eliecer Tamayo por nunca dejar de  
creer en mí y su apoyo incondicional para cumplir mis sueños, los amo mucho.  
A mis amigas Pao, Liz y Diani por sus consejos, apoyo, compañía y comprensión  
durante toda la carrera, son las mejores amigas que pudo haber pensado Cristo  
para mi vida.*

**María Alejandra Tamayo León**

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras de este proyecto de grado quieren expresar su agradecimiento a:  
A Dios por abrirnos las puertas en Golden Flex S.A, la inteligencia, fuerza, paciencia y su respaldo para desarrollar el proyecto de grado.

A nuestra familia por su apoyo, consejos y colaboración para culminar las metas que emprendemos.

Al ingeniero Germán López por darnos la oportunidad de realizar el Proyecto de Grado en la empresa, su conocimiento, apoyo y colaboración constante para cumplir con los objetivos planteados. Además, a las personas de la empresa que nos colaboraron en su momento con lo que necesitábamos.

A los ingenieros Julio Iván Guerrero y Héctor Lozano por su colaboración, conocimiento y asesoría con el Proyecto.

Al ingeniero Oscar Sanabria por la colaboración para realizar las cromatografías de gases en Tintas S.A.

Al profesor Giovanny Forero por su conocimiento y colaboración para realizar los experimentos en el Centro de Gestión Industrial Sena.

Al asesor Fernando Moreno por brindarnos su colaboración, apoyo, asesoría y revisión para lograr cumplir los objetivos propuestos.

Al ingeniero Felipe Correa por la asesoría constante, conocimiento y colaboración durante todo el desarrollo del Proyecto.

Al profesor Gerardo Rodríguez por el conocimiento y asesoría para desarrollar satisfactoriamente el Proyecto.

<b>CONTENIDO</b>	<b>pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>24</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>25</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>28</b>
1.1 TINTAS	28
1.1.1 Concentrado de color.	28
1.1.2 Vehículo líquido.	28
1.1.3 Clasificación de las tintas.	28
1.1.3.1 Tintas a base de agua	28
1.1.3.2 Tintas a base de solvente.	29
1.1.3.3 Tintas offset.	30
1.1.3.4 Tintas de secado por ultravioleta.	30
1.2 SOLVENTES	30
1.2.1 Solventes Orgánicos.	31
1.2.1.1 Clasificación de los solventes.	31
1.2.2 Solventes utilizados en la industria flexográfica.	32
1.2.3 Recuperación de solventes.	35
1.2.3.1 Fases del proceso de recuperación de los solventes.	35
1.3 MARCO LEGAL	37
<b>2. DIAGNÓSTICO</b>	<b>38</b>
2.1 SOLVENTES UTILIZADOS EN EL PROCESO	38
2.1.1 Propanol.	39
2.1.2 N-propil acetato (NPA).	40
2.1.3 Etanol.	40
2.1.4 Acetato de etilo.	41
2.1.5 Metoxipropanol.	43
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	44
2.3 CARACTERIZACIÓN	47
2.3.1 Muestreo.	48
2.3.2 Análisis de la muestra.	48
2.3.2.1 Cromatografía de gases.	48
2.3.2.2 Contenido de sólidos.	54
2.3.2.3 Contenido de humedad.	55
2.4 BALANCE DE MATERIA.	56



<b>3. ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SOLVENTES</b>	<b>60</b>
3.1 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN	60
3.1.1 Métodos de separación mecánica.	60
3.1.1.1 Filtración.	60
3.1.1.2 Sedimentación.	61
3.1.1.3 Flotación.	61
3.1.1.4 Centrifugación.	61
3.1.2 Métodos de separación basados en el equilibrio.	64
3.1.2.1 Destilación.	64
3.1.2.2 Cristalización.	65
3.1.2.3 Evaporación.	65
3.1.2.4 Adsorción.	66
3.1.2.5 Extracción.	66
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN	71
3.2.1 Técnicos.	72
3.2.2 Financieros.	73
3.2.3 Seguridad.	74
3.2.4 Ambientales.	74
3.2.5 Materia prima.	75
3.2.6 Localización.	75
3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SEPARACIÓN.	75
3.3.1 Equilibrio vapor líquido sistema multicomponente.	81
3.3.2 Determinación punto de burbuja y rocío.	85
3.3.3 Prueba de destilación.	93
3.3.4 Cromatografía de gases.	99
 <b>4. SISTEMA DE RECUPERACIÓN</b>	 <b>104</b>
4.1 DESTILACIÓN BATCH	104
4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE	112
4.3 BALANCE DE ENERGIA	113
4.4 CONDENSADOR	116
4.5 CHAQUETA DE CALENTAMIENTO	126
4.6 AISLANTE TANQUE	133
4.7 TANQUE DE ALMACENAMIENTO	137
4.8 SISTEMA DE TUBERÍA	138
 <b>5. COSTOS</b>	 <b>141</b>
5. 1 COSTOS DE INVERSIÓN	142
5.1.1 Especificaciones Equipo.	142

5.1.2 Costos operacionales.	144
5.1.2.1 Costos de energía.	145
5.1.2.2 Costos operario.	145
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>149</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>151</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>152</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>164</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas propanol	39
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de NPA	40
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del etanol	41
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del acetato de etilo	42
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del metoxipropanol	43
Tabla 6. Flujos de proceso.	46
Tabla 7. Resultados cromatografía de gases materia prima Solflex MP.	50
Tabla 8. Resultados cromatografía de gases materia prima Metoxipropanol.	51
Tabla 9. Resultados cromatografía de gases materia prima Solflex EP	51
Tabla 10. Resultados cromatografía de gases solvente recuperado.	52
Tabla 11. Resultados de la cromatografía de gases del residuo líquido.	53
Tabla 12. Resultados CG EM del residuo líquido	54
Tabla 13. Contenido de sólidos totales del residuo solvente.	55
Tabla 14. Contenido de humedad del residuo solvente.	55
Tabla 15. Contenido de humedad de los componentes que integran el residuo solvente por el método de análisis Karl Fischer	56
Tabla 16. Resultados balance de material.	58
Tabla 17. Indicadores de consumo por kg de sustrato impreso.	58
Tabla 18. Rangos de calificación criterios.	71
Tabla 19. Rangos de calificación alternativas	72
Tabla 20. Historial de producción.	80
Tabla 21. Constantes de Antoine	82
Tabla 22. Constantes ecuación para NRTL	84
Tabla 23. Flujos másicos y molares	88
Tabla 24. Temperatura de saturación.	89
Tabla 25. Resultados presión de saturación y coeficiente $\gamma$ .	90
Tabla 26. Resultados determinación punto de burbuja.	90
Tabla 27. Temperatura de saturación.	91
Tabla 28. Presión de saturación a 350,45 K	91
Tabla 29. Fracción molar líquida	92
Tabla 30. Relación de equilibrio y coeficiente de actividad.	92
Tabla 31. Parametros para $P_j^{Sat}$	93
Tabla 32. Resultados determinación punto de rocío.	93
Tabla 33. Resultado destilación de la muestra de residuo.	94
Tabla 34. Desviación prueba de destilación	95
Tabla 35. Resultado destilación residuo sólido.	98
Tabla 36. Resultado destilación al vacío.	99
Tabla 37. Resultados de la CG de las fracciones de destilado.	100

Tabla 38. Resultados de la cromatografía de gases fracción rotaevaporador.	100
Tabla 39. Datos de entrada balance de materia.	101
Tabla 40. Flujos y composiciones de los componentes clave y el más volátil.	109
Tabla 41. Composiciones en el destilado y los fondos.	110
Tabla 42. Propiedades Acero inoxidable AISI 304	115
Tabla 43. Valores de entrada características de la mezcla	138
Tabla 44. Perdidas por accesorios.	139
Tabla 45. Historial costos de recuperación de residuo solvente	141
Tabla 46. Costo de solventes nuevos empleados en el proceso de impresión	141
Tabla 47. Especificaciones técnicas destilador D 60 Al. Controlgraf.	142
Tabla 48. Especificaciones técnicas destilador IST. 62 ATEX II 2 G	142
Tabla 49. Costos asociados a la adquisición del destilador.	143
Tabla 50. Costos asociados con la importación del equipo.	143
Tabla 51. Impuestos.	143
Tabla 52. Disposición del residuo sólido.	144
Tabla 53. Mantenimiento de la máquina destiladora de solventes.	145
Tabla 54. Costos de personal	145
Tabla 55. Costos de personal manejo maquina destiladora.	146
Tabla 56. Retorno de la inversión incluyendo gastos operacionales.	146
Tabla 57. Amortización crédito	147

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura propanol.	39
Figura 2. Estructura del N-Propil acetato (NPA).	40
Figura 3. Estructura del etanol.	41
Figura 4. Estructura del acetato de etilo.	42
Figura 5. Proceso de producción Golden Flex S.A.	46
Figura 6. Diagrama de flujo de los solventes	57
Figura 7. Selección modelo termodinámico a partir del diagrama de Carlson.	83
Figura 8. Algoritmo calculo temperatura de burbuja.	87
Figura 9. Algoritmo cálculo temperatura de rocío	88
Figura 10. Montaje prueba de destilación simple.	94
Figura 11. Residuo de la prueba de destilación.	96
Figura 12. Determinación densidad de la mezcla	98
Figura 13. Montaje de destilación al vacío.	99
Figura 14. Diagrama de proceso destilación	102

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Cromatograma materia prima solflex MP	49
Gráfica 2. Cromatograma materia prima Metoxipropanol.	50
Gráfica 3. Cromatograma materia prima solflex EP	51
Gráfica 4. Cromatograma solvente recuperado.	52
Gráfica 5. Cromatograma residuo líquido por análisis de CG	53
Gráfica 6. Cromatograma residuo líquido por análisis de CG EM	54
Gráfica 7. Porcentaje criterios de selección.	72
Gráfica 8. Porcentaje criterios de selección.	76
Gráfica 9. Curva de destilación.	95
Gráfica 10. Curva de destilación promedio.	96
Gráfica 11. Evolución de la composición en el destilado para cada fracción	97
Gráfica 12. Composición destilada vs tiempo. Reflujo 0,5	111
Gráfica 13. Composición destilada vs tiempo. Reflujo 1	111

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ley de Raoult	81
Ecuación 2. Ley de Raoult modificada	81
Ecuación 3. Fracción vapor en equilibrio	81
Ecuación 4. Fracción líquido en equilibrio	81
Ecuación 5. Fracción líquido normalizada.	82
Ecuación 6. Ecuación de Antoine	82
Ecuación 7. Temperatura de saturación	82
Ecuación 8. Modelo NRTL	83
Ecuación 9. Coeficiente de actividad modelo NRTL	84
Ecuación 10. Parametro $G_{ji}$ , NRTL	84
Ecuación 11. Coeficiente $\tau_{ij}$ , NRTL	84
Ecuación 12. Coeficiente $\tau_{ji}$ , NRTL	84
Ecuación 13. Deducción equilibrio haciendo $y=1$	85
Ecuación 14. Deducción equilibrio haciendo $x=1$	85
Ecuación 15. Coeficiente de reparto	85
Ecuación 16. Coeficiente de reparto para el equilibrio.	85
Ecuación 17. Relación equilibrio punto de burbuja	86
Ecuación 18. Relación equilibrio punto de rocío	86
Ecuación 19. Presión de saturación $P_j$	86
Ecuación 20. Temperatura de mezcla punto burbuja	86
Ecuación 21. Temperatura de mezcla punto rocío	87
Ecuación 22. Porcentaje compuestos orgánicos volátiles	101
Ecuación 23. Balance de materia global destilación por lotes	107
Ecuación 24. Balance por componente destilación por lotes.	107
Ecuación 25. Ecuación de Fenske	107
Ecuación 26. Ecuación de Gilliland.	108
Ecuación 27. Ecuación de Gilliland.	108
Ecuación 28. Ecuación de Eduljee.	108
Ecuación 29. Ecuacion de Underwood	108
Ecuación 30. Densidad	112
Ecuación 31. Relación altura sobre diametro	112
Ecuación 32. Volumen de un cilindro	112
Ecuación 33. Balance entálpico	113
Ecuación 34. Entalpia relativa	114
Ecuación 35. Calor	114
Ecuación 36. Calor latente de vaporización	115
Ecuación 37. Balance de energía del sistema	116
Ecuación 38. Balance de energía intercambiador de calor.	118

Ecuación 39. Diferencia de temperatura media logarítmica	118
Ecuación 40. Balance etapa de enfriamiento	118
Ecuación 41. Calor específico mezcla.	119
Ecuación 42. Calor específico componente	119
Ecuación 43. Viscosidad de la mezcla.	119
Ecuación 44. Densidad de la mezcla.	120
Ecuación 45. Conductividad térmica	120
Ecuación 46. Balance de energía vapor.	121
Ecuación 47. Factor de corrección $F_T$	121
Ecuación 48. Numero de tubos	122
Ecuación 49. Distancia imaginaria o claro	123
Ecuación 50. Area de flujo intercambiador	123
Ecuación 51. Diámetro equivalente.	123
Ecuación 52. Área de flujo de tubos.	124
Ecuación 53. Velocidad másica de la mezcla.	124
Ecuación 54. Número de Reynolds	124
Ecuación 55. Número de Prandtl.	125
Ecuación 56. Número de Nusselt.	125
Ecuación 57. Coeficiente de convección.	125
Ecuación 58. Coeficiente de convección m.	125
Ecuación 59. Coeficiente global limpio	126
Ecuación 60. Flujo de aceite diátermico	128
Ecuación 61. coeficiente de transferencia de calor para el fluido interno	129
Ecuación 62. Número de Prandtl	130
Ecuación 63. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido exterior	130
Ecuación 64. Coeficiente global limpio.	131
Ecuación 65. Altura tanque.	132
Ecuación 66. Número de Nusselt régimen turbulento	132
Ecuación 67. Resistencia termica del aislante.	133
Ecuación 68. Resistencia termica con aislante	133
Ecuación 69. Calor con aislante	134
Ecuación 70. Calor sin aislante	134
Ecuación 71. Coeficiente de diseño $U_d$	136
Ecuación 72. Coeficiente de transferencia fluido externo.	136
Ecuación 73. Temperatura de pared fluido caliente.	136
Ecuación 74. Temperatura de pared fluido frio.	136
Ecuación 75. Factor de fricción.	138
Ecuación 76. Ecuación de Darcy Weisbach.	139
Ecuación 77. Perdidas por carga.	139



## LISTA DE CUADROS

	<b>pág.</b>
Cuadro 1. Condiciones de operación de los equipos de CG y CG-EM	49
Cuadro 2. Ventajas y desventajas métodos de separación mecánica	62
Cuadro 3. Métodos de fraccionamiento.	65
Cuadro 4. Ventajas y desventajas métodos de separación por equilibrio.	68
Cuadro 5. Ventajas y desventajas de los tipos de destilación	77

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág</b>
<b>Anexo A.</b> Ficha técnica solventes (ver CD)	165
<b>Anexo B.</b> Cuadro comparativo técnicas analíticas (ver CD)	166
<b>Anexo C.</b> Plan de muestreo (ver CD)	167
<b>Anexo D.</b> Protocolos cromatografías (ver CD)	168
<b>Anexo E.</b> Cromatografías solventes diagnostico (ver CD)	169
<b>Anexo F.</b> Cromatografía acoplada a espectro de masas (ver CD)	170
<b>Anexo G.</b> Prueba contenido de sólidos (ver CD)	171
<b>Anexo H.</b> Prueba contenido de humedad (ver CD)	172
<b>Anexo I.</b> Matriz de selección (ver CD)	173
<b>Anexo J.</b> Prueba de destilación (ver CD)	174
<b>Anexo K.</b> Cromatografía fracciones prueba de destilación (ver CD)	175
<b>Anexo L.</b> Simulación Chemcad (ver CD)	176
<b>Anexo M.</b> Muestra de cálculo (ver CD)	177
<b>Anexo N.</b> Planos (ver CD)	178
<b>Anexo O.</b> Cotizaciones destiladores (ver CD)	179

## LISTA DE ABREVIATURAS

CG: cromatografía de gases  
CG-EM: cromatografía de gases acoplada a espectrómetro de masas  
cm: centímetros  
°C: grados celsius  
kg: kilogramo  
g: gramo  
hPa: hectopascal  
ISO: Organización Internacional de Normalización  
kPa: Kilo pascales  
μL: microlitro  
L: litros  
m: metro  
min: minutos  
mL: mililitro  
mmHg: milímetros de mercurio  
NPA: acetato de propilo  
NTC: norma técnica colombiana  
OH: hidroxilo  
pH: potencial de hidrogeno  
PEBD: polietileno de baja densidad  
PEHD: polietileno de alta densidad  
PELL: polietileno lineal  
seg: segundo

## GLOSARIO

**ALCOHOL:** es aquel compuesto orgánico que contiene un grupo hidroxilo (-OH) en sustitución de un átomo de hidrógeno, de un alcano, enlazado de forma covalente a un átomo de carbono, grupo carbonilo (C-OH). Además este carbono debe estar saturado, es decir, debe tener sólo enlaces sencillos a sendos átomos (átomos adyacentes); esto diferencia a los alcoholes de los fenoles.<sup>1</sup>

**CETONA:** es un compuesto orgánico que se caracteriza por poseer un grupo funcional carbonilo unido a dos átomos de carbono. Las cetonas se forman cuando dos enlaces libres que le quedan al carbono del grupo carbonilo se unen a cadenas hidrocarbonadas.<sup>2</sup>

**COLORANTE:** material que imparte el color requerido al material de recubrimiento en el cual está disuelto.<sup>3</sup>

**COV'S:** (siglas en inglés volatile organic compounds), es cualquier compuesto de carbono, excluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos y carbonatos metálicos y carbonato de amonio que participa en reacciones atmosféricas fotoquímicas, excepto los designados por la EPA como exentos de VOC por tener reactividad fotoquímica despreciable<sup>4</sup>.

**DESTILACIÓN:** es una de las principales técnicas para purificar líquidos volátiles. La destilación hace uso de la diferencia entre los puntos de ebullición de las sustancias que constituyen una mezcla. Las dos fases en una destilación son: la vaporización o transformación del líquido en vapor y la condensación o transformación del vapor en líquido. Existen varias clases de destilación, la elección en cada caso se hace de acuerdo con las propiedades del líquido que se pretenda purificar y de las impurezas que lo contaminan.

**ÉTER:** es un compuesto orgánico formado por un grupo funcional del tipo R-O-R, son compuestos que resultan de la unión de dos radicales alquílicos o aromáticos a través de un puente de oxígeno. Se caracteriza porque es una sustancia que tiene

---

<sup>1</sup> IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. Alcohols. [Citado en enero de 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://goldbook.iupac.org/html/A/A00204.html>

<sup>2</sup> MORRISON, Robert T.; BOYD, Robert N. Química orgánica. Quinta edición. Boston: Allyn and Bacon, 1998. p. 763.

<sup>3</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Pinturas y barnices. Términos y definiciones. NTC 5812. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2010.

<sup>4</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Etiquetas ambientales tipo I. Sello ambiental colombiano (SAC). Criterios ambientales para tintas para impresión. NTC 6039. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. p.4.

poca reactividad química, en contacto con el aire sufre una lenta oxidación en la que se forman peróxidos muy inestables y poco volátiles.<sup>5</sup>

**IMPRESIÓN FLEXOGRÁFICA:** proceso o método de impresión con forma impresora que utiliza formas flexibles en relieve en donde las áreas sobresalientes entidades reproducen imágenes sobre un sustrato.<sup>6</sup>

**PIGMENTO:** materia colorante, generalmente en forma de partículas finas, que prácticamente es insoluble en el medio y se usa por sus propiedades ópticas, protectoras y/o decorativas.<sup>7</sup>

**PROCESO CORONA:** los plásticos se caracterizan por tener superficies impermeables e inertes, lo cual hace que la superficie no sea receptiva para adherirse a sustratos como tintas de impresión, adhesivos y recubrimientos. El proceso corona aumenta la energía de la superficie de los plásticos con fin de incrementar la permeabilidad de los mismos para favorecer a la adhesión de las tintas, cubiertas y adhesivos. El principio se basa en un fenómeno eléctrico.<sup>8</sup>

**PURIFICACIÓN:** es reducir el nivel de sustancias “dañinas” o que no se requieren en el proceso.

**RECUPERACIÓN:** incluye operaciones unitarias, que abarcan los métodos de separación, para volver a usar determinados componentes nuevamente en un proceso u operación.

**REFILADO:** es un proceso en el que se elimina el sobrante que pueden presentar las láminas de sustrato, para ello se puede dejar una determinada longitud en estas o usar dispositivos automatizados que ajusten el rollo a la medida exacta, antes de la operación de sellado, asegurando la utilización de todo el material<sup>9</sup>.

**REPISE:** se puede dar por dos formas la primera es por transferencia de tinta a la bobina causando que durante la impresión la tinta tiende a irse a un solo lado del sustrato y la otra es que en el proceso de impresión haya transferencia de la tinta

---

<sup>5</sup> MORRISON, Robert T.; BOYD, Robert N. Química orgánica. Quinta edición. Boston: Allyn and Bacon, 1998. p. 686-688.

<sup>6</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Etiquetas ambientales tipo I. Sello ambiental colombiano (SAC). Criterios ambientales para tintas para impresión. NTC 6039. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. p. 3.

<sup>7</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Pinturas y barnices. Términos y definiciones. NTC 5812. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. p. 3-4.

<sup>8</sup> OJEDA, Mariano. Tecnología de los plásticos. Tratamiento corona. [Citado en febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2012/05/tratamientocorona.html>.

<sup>9</sup> Plásticos Correa S.A.S. Empaques flexibles. Procesos empresariales. [Citado en febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.plasticoscorrea.com/es/procesos-empresariales>

cuando pasa por el fotopolímero, reflejando en ambos casos una imagen fantasma por migración de tinta<sup>10</sup>.

**RESIDUO:** “cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o normatividad vigente así lo estipula”.<sup>11</sup>

**SEPARACIÓN:** es un proceso que se usa para transformar una mezcla de sustancias en dos o más productos distintos. Los productos separados podrían diferir en propiedades químicas o algunas propiedades físicas.

**SOLVENTE:** es una mezcla homogénea de dos o más componentes. Homogénea indica que la mezcla es uniforme en composición y propiedades, es decir, que cualquier proporción de la solución es equivalente a cualquier otra, en concentración y propiedades físicas y química. Usualmente el componente en mayor proporción se denomina “solvente” y los que se hallan en menor proporción “soluto”, por lo general sólido o líquido, pero con mayor concentración. El soluto universal es el agua, por su neutralidad en el proceso y su fácil adaptación a la transformación de nuevas moléculas de otros elementos.<sup>12</sup>

**SUSTRATO:** superficie de impresión.<sup>13</sup>

**TINTA:** dispersión de un pigmento en un vehículo que es transferido a través de un proceso de impresión para producir una imagen en un sustrato<sup>14</sup>.

---

<sup>10</sup> GUERRERO, Julio Iván. Director técnico comercial tintas. Industrias Lember S.A. Bogotá, Colombia.2017.

<sup>11</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 (30, 12, 2005). Por el cual se (Reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral). Bogotá D.C.: El ministerio, 2005. p.1.

<sup>12</sup> RIAÑO, Néstor. Fundamentos de química analítica básica. Análisis cuantitativo. Segunda edición. Colombia: Universidad de Caldas, 2007. p. 19-20.

<sup>13</sup> Diseño y Comunicación gráfica. Papeles y sustratos editorial y de la comunicación gráfica. [Citado el 17 de agosto de 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://hdiseno-i-gab2012-1.wikispaces.com/file/view/papeles+y+sustratos.pdf/336812198/papeles+y+sustratos.pdf>

<sup>14</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Etiquetas ambientales tipo I. Sello ambiental colombiano (SAC). Criterios para tintas para impresión. NTC 6039. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. p. 4.

## RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar una alternativa de separación para dar solución al problema de manejo de residuos solvente generados en el proceso de impresión en la empresa Golden Flex S.A, donde también se busca la viabilidad económica del método seleccionado.

Con base en lo anterior el proyecto de grado se desarrolla a lo largo de 5 capítulos principales, en el primero de ellos se presenta el marco teórico respecto a las tintas y solventes orgánicos junto con el marco legal vigente para estas sustancias; el segundo capítulo contiene el diagnóstico realizado ,que incluye las materias primas (solventes) que intervienen en la operación de impresión, la caracterización del residuo solvente y la descripción general del proceso, que se evidencio en el historial de producción y soportes de pago; el tercer capítulo contiene las alternativas de separación, los criterios, la matriz de selección empleada teniendo en cuenta la metodología de Kepner Tregoe; el cuarto capítulo abarca el diseño con especificaciones técnicas de la alternativa seleccionada; en el último capítulo se hace énfasis en los costos de inversión o Capex y los costos operaciones para evaluar el costo de la alternativa.

Se realizó la caracterización del residuo, obteniendo  $4,7573 \pm 0,7172$  % de solidos totales y 2,1680 % de humedad. Además, se desarrolló el método establecido por la NTC 619, usando un montaje de destilación simple, para determinar la curva de destilación, de acuerdo a la metodología, se tomaron 10 fracciones de destilado de 10 mL, a partir de los resultados obtenidos se realizó una curva de destilación promedio. Mediante la técnica cromatografía de gases, se estableció la composición de cada fracción tomada, a partir de un balance de materia por componente, junto con los resultados de la prueba de gravimetría y humedad por el método de Karl Fisher, se determinó la composición en flujo molar del destilado y lodo para obtener un diagnóstico acertado del método de destilación, a partir de esto, se pudo establecer las fracciones más adecuadas que se requieren en el lavado de las unidades de impresión y dilución de tintas.

**PALABRAS CLAVE:** Residuo solvente, residuo de tinta, compuestos orgánicos volátiles, curva de destilación, destilación batch, mezcla multicomponente.

## INTRODUCCIÓN

El manejo de residuos es un tema de gran importancia en la actualidad, no solo a nivel ambiental sino económicamente hablando. El gran desarrollo de la tecnología y el crecimiento de la sociedad ha traído consigo el aumento de consumo, por ende, el de producción y de residuos. La falta tecnología e infraestructura en países subdesarrollados como Colombia hace que esta problemática se trate de una manera lenta, lo cual ha originado el desarrollo de tecnologías más eficientes para el manejo de residuos. La industria flexográfica, es una industria que se caracteriza por utilizar solventes que resultan muy contaminantes para el medio ambiente y que generalmente son causantes de problemas en la salud de las personas que manipulan este tipo de solventes, en este contexto existe una creciente necesidad por dar una adecuada disposición a los residuos que se generan para minimizar la contaminación generada por estos solventes. Asimismo, es una industria que requiere de insumos de excelente calidad para poder competir con el mercado globalizado que cada vez va volviéndose más exigente.

Golden Flex S.A., es una empresa ubicada en la Zona Franca de Fontibón en Bogotá, dedicada a la conversión de empaques plásticos para el sector alimentos, industrial, correos y publicitarios, dentro de su producción intervienen procesos de extrusión, impresión, laminación, refilado, doblado y sellado. Sin embargo, es en el proceso de impresión donde se utilizan los solventes que se utilizan como agentes diluyentes de las tintas, acelerantes, retardantes en el secado y en el lavado de las unidades de impresión, como la compañía carece de un sistema de recuperación interno de residuo solventes líquidos resultantes de la operación de impresión, es necesario tercerizar el proceso de recuperación. Además, es indispensable darle una mejor disposición a este residuo para garantizar la calidad del solvente que se recircula al proceso de impresión.

El residuo a manejar se trata de una mezcla de solventes no halogenados con sólidos solubles en su mayoría, por lo tanto, los métodos de separación que se aplican a este tipo de mezclas son aquellos cuyo principio se basa en la diferencia de volatilidades. Para ello, se ha planteado y diseñado una alternativa que consiste en realizar la recuperación del residuo solvente internamente en la empresa, para la dilución de las tintas y la recirculación de este solvente a la operación de impresión.



## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una propuesta para la recuperación de solventes utilizados en la empresa Golden Flex S.A.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar los residuos de solventes usados en la empresa Golden Flex S.A.
- Seleccionar la alternativa de separación de los residuos solventes.
- Determinar las especificaciones técnicas según la alternativa seleccionada.
- Analizar los costos relacionados con la alternativa seleccionada para la recuperación del solvente.

## JUSTIFICACIÓN

La investigación surge de un planteamiento realizado por la empresa GOLDEN FLEX S.A, como un problema que presentan al ser una industria productora de empaques flexibles en polietileno. En la actualidad entidades controladoras como el Invima y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, exigen a las empresas, la implementación de medidas respecto al reúso de residuos especialmente los de carácter tóxico, estas medidas representan un costo adicional. Con el fin de disminuir estos costos, minimizar los mismos por concepto de compra de solventes y por la creciente demanda ambiental en el sector industrial relacionado con las concentraciones de contaminantes de carácter tóxico, además para mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de los residuos, se plantea el desarrollo de una alternativa de aprovechamiento de los residuos solventes.

La importancia del desarrollo del presente trabajo se fundamenta en un beneficio de carácter económico y en la eficiencia en el proceso de producción. Debido a que, en la actualidad, la planta carece de un sistema de recuperación de los residuos solventes utilizados en el proceso de impresión para diluir las tintas y en el lavado de unidades de las impresoras, puesto que la empresa contrata estos servicios a terceros. Situación en la que se generan gastos que podrían ser descartados, al realizar el proceso de recuperación para lo cual, posteriormente se evaluaría los costos para la empresa.

En las últimas décadas, los actores en general de las industrias como empleados, proveedores, empresarios, sector público y colaboradores se han esforzado por conseguir que la sostenibilidad se convierta en el pilar para el proceso productivo para entregar productos de alta calidad amigables con el medio ambiente, siendo aplicable en cualquier nivel. Lo cual, genera beneficios a la compañía como disminución de costos al mejorar el uso de materiales y recursos, valor agregado en cuanto a gestión, procesos y productos, acceso a nuevos mercados y fortalecimiento de la imagen pública.

Por otra parte, la mayoría de los solventes son tóxicos e inflamables, lo cual genera un impacto negativo al medio ambiente y a la salud de las personas que están en contacto con estos solventes. Además, por su ubicación, se hace necesario, realizar un correcto manejo de estos residuos, siendo de gran ayuda el desarrollo de un sistema de recuperación, para gestionar los remanentes de solventes de tal manera que se pueda establecer un desarrollo técnico, económico y ambientalmente sostenible.

Por lo cual, la industria de impresión flexográfica está cada vez más informada tanto de los productos y servicios que intervienen en su proceso de producción como de darle una adecuada disposición a los residuos que se generan para minimizar la contaminación que genera y reducir gastos. Asimismo, esta industria requiere de insumos de excelente calidad como solventes, tintas, polietileno entre otros

sustratos para poder competir con el mercado globalizado que va volviéndose más exigente con el producto que se vende.

El principal impacto por emisiones, que genera la industria flexográfica está relacionado con los compuestos orgánicos volátiles que afectan la salud de los empleados, por lo que utiliza en su producción solventes, tintas aditivos y materiales plastificantes; éstos en las fases de impresión y secado por su alta volatilidad tienden a evaporarse que al oxidarse o transformarse con el contacto de la luz solar genera contaminantes atmosféricos o fotoquímicos<sup>15</sup>.

Este trabajo permite al ingeniero químico, aplicar metódicamente los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. Fundamentalmente se hará énfasis en las asignaturas que integran la ingeniería aplicada y las ciencias básicas de la ingeniería, lo cual nos da la capacidad de diseñar, evaluar, analizar técnica y económicamente los diferentes métodos de separación, para seleccionar el que más se ajuste a las características de los residuos de solventes generados en las operaciones de secado y limpieza, que permita la eventual implementación en la planta.

---

<sup>15</sup>ANDIGRAF. Industria editorial y de la comunicación gráfica. [Citado en 7 de agosto de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.andigraf.com.co/files/informe\\_economico/2015/informe\\_de\\_sostenibilidad\\_2013\\_industria\\_editorial\\_y\\_de\\_la\\_comunicacion\\_grfica.pdf](http://www.andigraf.com.co/files/informe_economico/2015/informe_de_sostenibilidad_2013_industria_editorial_y_de_la_comunicacion_grfica.pdf)

## 1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo reúne definiciones sobre los sustratos utilizados en la industria flexográfica, haciendo énfasis en los solventes.

### 1.1 TINTAS

Es una mezcla homogénea conformada por resinas sintéticas, aditivos, colorantes y disolventes cuya función es reproducir una imagen a través de sustratos. Están compuestas por un concentrado de color y un vehículo líquido<sup>16</sup>.

**1.1.1 Concentrado de color.** El concentrado de color es un componente de las tintas, el cual está conformado por pigmentos o colorantes, siendo el pigmento partículas insolubles en el vehículo y el colorante por el contrario es soluble en el vehículo.<sup>17</sup>

**1.1.2 Vehículo líquido.** El vehículo está compuesto por tres sustancias que son la resina, solvente y los aditivos; los que se encargan de las siguientes funciones principalmente: Transportar el color de fuente de tinta al sustrato, estabilizar la viscosidad, proporcionar resistencia y ayudar a adherir el color a la superficie.<sup>18</sup>

**1.1.3 Clasificación de las tintas.** Las tintas usadas en la industria flexográfica se clasifican en tres grandes grupos, que van de acuerdo con el sistema de secado utilizado.

**1.1.3.1 Tintas a base de agua.** Son tintas “que se secan por oxidación al contacto con el aire”<sup>19</sup>, en la industria se utilizan secadores de aire caliente o con fijadores o catalizadores, este tipo de tintas se utiliza especialmente imprimir sobre tela. Para las tintas base agua se utilizan las resinas acrílicas hidrosolubles.

---

<sup>16</sup> ETIGRAF S.A. Elementos que intervienen en el proceso flexográfico. [Citado el 3 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.etigraf.com.co/es/component/content/article?id=135-elementos-que-intervien-en-el-proceso-flexografico>

<sup>17</sup> & <sup>18</sup> COMEX. Coloración de plásticos. [Citado el 3 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://tecno-logiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/03/coloracion-de-plasticos.html>

<sup>19</sup> COLORBAR SA. Tintas de impresión flexografica. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://impregon.com/pdf/tintas.pdf>

- **Resinas acrílicas.** Son resinas que tienen un amplio rango de peso molecular, son polímeros y copolímeros del metil, etil, n-butil e isobutil metacrilato<sup>20</sup>. Estas resinas se caracterizan por ser solubles en agua después de ser neutralizadas con una amina, se caracterizan por presentar buen brillo, rápido secado y buena dureza.<sup>21</sup>

**1.1.3.2 Tintas a base de solvente.** Son aquellas en las cuales “los pigmentos se encuentran disueltos en disolventes orgánicos no polares”<sup>22</sup> se caracterizan porque, son tintas que presentan resistencia a la decoloración, son muy utilizadas para la impresión sobre superficies plásticas, debido, a que el solvente se disuelve sobre ésta de manera tal que el pigmento de la tinta se fija en la superficie después de que el solvente se evapore, lo cual genera una gran resistencia y durabilidad. Las resinas más utilizadas para tintas base solvente son las poliamidas, la nitrocelulosa y el poliuretano.<sup>23</sup>

- **Resina nitrocelulosa.** El nitrato de celulosa o nitrocelulosa se obtiene por reacción de la celulosa en un baño de nitración constituido por ácidos sulfúricos y nítrico. Las resinas nitrocelulosas se caracterizan principalmente porque poseen amplia solubilidad en disolventes orgánicos, son compatibles con diferentes resinas y plastificantes, son formadoras de películas transparentes e inodoras y de secado rápido, presentan resistencia al calor y a los álcalis <sup>24</sup>

- **Resina de poliamida.** Es un polímero con polioles y resina modificada, se usan industrialmente para proteger de la corrosión, mejorar y asegurar la adherencia de las capas de tinta, este tipo de resinas son solubles en alcoholes, formación de película, brillo, buena adhesión sobre polietilenos tratados, presentan moderada resistencia al calor y buena resistencia al roce.<sup>25</sup>

---

<sup>20</sup> PEREYRA, Andrea y GIUDICE, Carlos. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Comisión Nacional de investigaciones científicas de la Provincia de Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional, 2009. ISBN 978-987-25360-2-2.

<sup>21</sup> Resinas acrílicas. [Citado el 18 de julio de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.aguiaquimica.com/es/productos-categorias/14/hidrosolubles>.

<sup>22</sup> GARCÍA, J. Croma. Tintas de impresión. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://www.cromaiberica.com/46-tintas-base-solvente-para-serigrafia>.

<sup>23</sup> COSMOS. Generalidades de las Tintas Flexograficas. [Citado el 18 de julio de 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/tintas-flexograficas-cj1d.html>.

<sup>24</sup> Transformaciones Químico Industriales S.L. Nitrocelulosa como recubrimiento [Citado el 3 de julio de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.traquisa.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=18&lang=es](http://www.traquisa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=18&lang=es). Barcelona.

<sup>25</sup> Tecnográficos & asesores LTDA. Flexografía. [Citado el 1 de agosto de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://tecnograficos.net/flexo.html>. Bogotá D.C.

- **Resinas cetónicas.** Las resinas cetónicas se obtienen mediante co-condensación de formaldehído con cetonas y el resultado es una gran variedad de productos, porque depende del tipo de cetona que se use, este tipo de resina se caracteriza por poseer buena dureza y brillo, son solubles en la mayoría de solventes a excepción del agua, solventes alifáticos y metanol, son estables a altas temperaturas y presentan buena adherencia sobre sustratos no metálicos.<sup>26</sup>

**1.1.3.3 Tintas offset.** También conocidas como tintas grasas convencionales, son aquellas que se caracterizan por presentar resistencia al roce, buen brillo y rápido secado. Aceites de origen vegetal o mineral forman parte del vehículo, que es el encargado de ofrecer propiedades específicas.<sup>27</sup> Este tipo de tintas emplean infrarrojo para el secado.<sup>28</sup>

**1.1.3.4 Tintas de secado por ultravioleta.** Las Tintas ultravioleta ofrecen características de resistencia y durabilidad, que requieren de exposición a luz ultravioleta para lograr el secado de la tinta, mediante la transformación de una capa de tinta líquida a una sólida por medio de una fuente de la luz ultra violeta. Al comparar con otros tipos de tintas, es sustituir el vehículo por fotopolímeros. Este tipo de tintas ofrece ventajas principalmente dar mayor brillo en el producto impreso y rápido secado.<sup>29</sup>

## 1.2 SOLVENTES

Son sustancias orgánicas en estado líquido, la mayoría, derivados del petróleo, utilizados para disolver sólidos, gases u otros líquidos, gracias a sus propiedades permiten la dispersión de otra sustancia en esta a nivel molecular. Se emplean ampliamente en la industria de pinturas, tintas, pegamentos y empaques.

---

<sup>26</sup> Nitro química. Manual técnico de aplicación de tintas. Parte II. [Citado el 18 de julio de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual\\_tecnico\\_de\\_aplicacion-parte2.pdf](http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual_tecnico_de_aplicacion-parte2.pdf).

<sup>27</sup> PortalGraf. Tintas Offset. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: <https://www.portalgraf.com/impresion/la-tinta-offset>

<sup>28</sup> COLORBAR SA. Las tintas de impresión. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://impregon.com/pdf/tintas.pdf>

<sup>29</sup> HERNANDEZ, R. Vd. Sistemas de curado UV. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://vision-digital.com.mx/2015/07/01/sistemas-para-curado-uv/>

**1.2.1 Solventes Orgánicos.** Como solventes orgánicos se define al conjunto de compuestos orgánicos líquidos con capacidad de disolver, suspender o extraer otra sustancia, sin reaccionar químicamente con la misma, manteniéndose inertes. Constituyen un amplio grupo de sustancias de diversa polaridad, permitiendo la disolución de sustancias orgánicas con polaridades similares.<sup>30</sup>

Los solventes orgánicos usualmente se caracterizan por tener “bajo punto de ebullición, se evaporan con facilidad y pueden ser recuperados por destilación luego de su uso. La mayoría de los solventes tienen menor densidad que el agua, excepto algunos halogenados como el cloruro de metileno o cloroformo que son más densos que el agua”<sup>31</sup>.

**1.2.1.1 Clasificación de los solventes.** Desde el punto de vista de la recuperación y disposición de residuos, los solventes se clasifican en dos grandes grupos<sup>32</sup>:

- **Solventes halogenados.** son generados principalmente por operaciones de secado, limpieza de metales y en menor extensión por desengrasado y eliminación de aceites en la industria textil y del cuero. Los peligros de este tipo de residuos consisten en su gran toxicidad, movilidad y su alta persistencia en el ambiente.

- **Solventes no halogenados.** dentro de este grupo de solventes se incluye un gran número de hidrocarburos, de los cuales los más comunes son el tolueno, metanol, isopropanol y etanol. Estos solventes se usan ampliamente en la producción de pinturas, tintas, adhesivos, resinas, preservantes de madera en base a solventes, cosméticos y para limpieza de equipos.

Los solventes son utilizados con varios fines: como agentes de limpieza, materias primas, disolventes, vehículos de otras sustancias, dispersantes, diluyentes, plastificantes, retardantes, tensoactivos y preservantes, a raíz de la variedad de usos que tienen estos se generan desechos variadas, entre los cuales se pueden identificar los solventes limpios, solventes mezclados, residuos de solventes cuando están mezclados con agua y lodos contaminados con solvente.<sup>33</sup>

---

<sup>30</sup> SHARAPIN, Nikolai. Fundamentos de tecnología de productos fitoterapéuticos. Colombia: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2000.p. 25. ISBN: 958-698-001-4.

<sup>31</sup> CARRION, Martha; CENTENO, Marcela; FUENTES, Elvira. Evaluación de la calidad del aire en áreas de prácticas de laboratorio y conocimientos de actitudes y practicas adecuadas de desecho de residuos. Solventes de desecho. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma, 2011.

<sup>32</sup> MÁRQUEZ, F. (2000). Manejo Seguro de Residuos Peligrosos. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: [http://www.heshn.com/archivos/gestion\\_residuos\\_peligrosos\\_chile.pdf](http://www.heshn.com/archivos/gestion_residuos_peligrosos_chile.pdf)

<sup>33</sup> MARTÍNEZ et al. (2005). Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fichas Temáticas Tomo II. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en: [http://web.idrc.ca/es/ev-95613-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://web.idrc.ca/es/ev-95613-201-1-DO_TOPIC.html)

Sin embargo, en la industria flexográfica, se encuentra que los solventes se clasifican de acuerdo a su poder de solubilidad en<sup>34</sup>:

- Solventes activos, son aquellos que disuelven, por sí solos, completamente una resina determinada.
- Solventes latentes son los que, si bien solos, no disuelven una resina, con la inclusión de pequeñas cantidades de solventes activos se comportan como solventes activos.
- Cosolventes, es una mezcla de dos solventes en la cual la resina es soluble, pero insoluble en los componentes por separado.
- Diluyente, son solventes que no disuelve la resina, pero es utilizado generalmente por razón de costos, o para disminuir el ataque al sustrato, sin afectar las propiedades de las tintas. El abuso de estos puede ocasionar precipitación de las resinas.

**1.2.2 Solventes utilizados en la industria flexográfica.** Los solventes utilizados en las tintas son los responsables principalmente de que la tinta no presente precipitación en la resina, brinde una buena transferencia al sustrato, humedezca el rodillo y evita el repise (Ver glosario) en la impresión. Además, tienen influencia sobre la nivelación, el brillo, resistencia al frote, adherencia, olor residual, la tactosidad entre otros, respecto a la película que se forma cuando es aplicada la tinta. En cuanto a la impresión los solventes manejan las siguientes tres propiedades:<sup>35</sup>

• **Poder de solvencia:** se refiere a la capacidad que tiene el solvente para disolver y mantener la resina en estado líquido dentro de la tinta. Siendo importante el tipo de resinas que contiene la tinta. De otra parte, lo más conveniente para diluir la tinta es usar una mezcla de solvente activado como acetato de etilo o NPA (acetato de N-propilo) y como alcohol propanol, isopropanol, etanol anhidro o etanol en una proporción del 96% respectivamente.

• **Velocidad de secado:** también llamada velocidad de evaporación, se refiere al solvente que se aparta de la superficie de la capa de tinta que ha sido aplicada, dejando un mínimo de residuo en ésta. Es indispensable que se tenga en cuenta la volatilidad del solvente debido a que en el caso de que el solvente se evapore rápido, la película de tinta se tiende a enfriar y a perder brillo, por el contrario, si su evaporación es lenta, causa ablandamiento en la película impresa, repise en el rollo impreso y olor residual.

---

<sup>34</sup> Que es una tinta. Cosalco Colombia LTDA. [Citado el 18 de julio de 2017]. [en línea]. Disponible en Presentación Alico.

<sup>35</sup> Nova report. Edición 1. Los solventes en la impresión flexográfica. Bogotá D.C, 2003 [Citado en marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en <http://novaflex.com.co/wp-content/uploads/2016/09/Novareport-206.pdf>



• **Balance de solventes:** se refiere a que la composición de la mezcla va variando a medida que transcurre el trabajo por las condiciones ambientales. Es por ello, que se hace necesario agregar retardantes como metoxipropanol o etoxipropanol y mezcla de acetatos (acetato de etilo o NPA) para que la tinta actúe adecuadamente sobre el sustrato.

A continuación, se mencionan los principales solventes empleados en la industria flexográfica, que intervienen en la operación de impresión y laminación como<sup>36</sup>:

- Propyflex: líquido incoloro, con olor característico, soluble en etanol y éter. Se utiliza para dilución de resinas y para soluciones de tintas empleadas en la industria flexográficas.
- Sucroflex: líquido transparente, soluble en ésteres y alcoholes. Empleado en la elaboración de mezclas para diluir resinas y para soluciones de tintas.
- Acetato metoxi propanol: es un líquido incoloro, soluble en agua y en la mayoría de disolventes. Por su baja velocidad de evaporación es utilizado en tintas para regular la velocidad de evaporación de los solventes. Además, gracias a su propiedad hidrófila es empleado en condiciones de alta humedad e higroscopicidad excesiva.
- Solflex EP: líquido incoloro, con solubilidad completa en ésteres y alcoholes. Usado para soluciones de tintas flexográficas y disolución de resinas.
- Solflex MP: líquido incoloro, con solubilidad completa en ésteres y alcoholes. Este solvente tiene múltiples aplicaciones en la industria flexográfica como disolvente de algunos adhesivos para laminación, en limpieza de las laminadoras, compensa la falta de NPA o acetato de etilo en larga duración y acelera el secado de las tintas o de rotograbado cuando se necesite.<sup>37</sup>
- Acetato de etilo: es un líquido altamente inflamable. Generalmente, puede aplicar en recubrimientos, tintas, adhesivos, cosméticos y en la industria agroquímica; aunque su uso es limitado para las aplicaciones anteriores.
- Acetato de isopropilo: líquido incoloro, soluble en alcohol, éter o hidrocarburos. Se utiliza como solvente en resinas (naturales y sintéticas), en pinturas y en tintas.<sup>38</sup>

---

36 SUCROAI S.A. Solventes flexo-pinturas. [Citado en marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://sucroal.com.co/products/propyflex/>

37 TRANSMERQUIM DE COLOMBIA S.A. Ficha de especificación técnica TM Solflex MP. Bogotá D.C, 2016. p. 2.

38 Distribuidora química Mexicana S.A de C.V, 2017. Ficha técnica cetato de isopropilo. [Citado el 5 de marzo de 2017]. [en línea]. Disponible en: <https://www.diquimex.mx/index.php>

- 2-Butanona: líquido incoloro, es miscible con solventes orgánicos y tiende a evaporarse rápidamente en contacto con el aire. Este disolvente se emplea en la industria de pinturas, tintas, adhesivos y limpieza.<sup>39</sup>
- Tolueno: Líquido incoloro, olor aromático, inmiscible en agua. Se utiliza como disolvente de aceites, resinas, caucho (natural y artificial), asfalto, hules, etil celulosa, poliestireno, polialcohol vínilico, ceras y resinas; mientras que como diluyente se usa en pinturas, barnices de celulosa, tintas de fotograbado, revestimientos, lacas nitrocelulósicas y en adhesivos.<sup>40</sup>
- Metil isobutil cetona: líquido incoloro, inflamable y tóxico. Solvente parcialmente soluble en agua y miscible en alcohol. Tiene variadas aplicaciones en síntesis orgánicas, resinas, solventes de gomas, pinturas, desengrasante de metales, producción de recubrimientos, tintas y adhesivos.<sup>41</sup>
- Etanol: líquido incoloro, volátil y de olor característico. Se utiliza industrialmente para la obtención de vinagre, acetaldehído, butadieno, cloruro de etilo y nitrocelulosa. Además se usa como disolvente en síntesis de lacas, cosméticos, tintas etc. y en mezcla como anticoagulante.<sup>42</sup>
- Isopropanol: líquido incoloro, es miscible en solventes orgánicos. Por ser un importante disolvente industrial se emplea como anticongelante, en aceites y tintas de secado rápido, perfumes, thinners, barnices y alcoholes.<sup>43</sup>
- Acetato de butilo: líquido incoloro, transparente, de olor aromático y de volatilidad media. Este disolvente es utilizado para la preparación de lacas a base de nitrocelulosa, barnice y adelgazadores, en pinturas, perfumería, removedores, fabricación de cuero artificial, productos de celuloide, tintas, elaboración de colorantes y madera plástica.<sup>44</sup>
- N-propanol: líquido incoloro, miscible con alcoholes, agua y éter etílico. Empleado como solvente para resinas, insecticidas, éteres y ésteres de celosa.

<sup>39</sup> Consejería de sanidad. Dirección general de salud pública. Riesgo químico - butanona. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <https://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/114696-butanona.pdf>

<sup>40</sup> Rippen. 1989. Tolueno. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea] Disponible en: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/-ENV/envsp/Vol345.htm>

<sup>41</sup> Distribuidora química mexicana S.A de C.V, 2017. Ficha técnica metil isobutil cetona. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://www.diquimex.mx/index.php/productos/item/54-metil-isobutil-cetona/54-metil-isobutil-cetona>

<sup>42</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. 2007. Hoja de seguridad XII etanol. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/12etanol.pdf>.

<sup>43</sup> MATER PRIM S.R.L. Ficha técnica isopropanol 2010. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://www.materprim.com.py/>

<sup>44</sup> SUCROAI S.A, 2015. Solventes flexo-pinturas. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <https://sucroal.com.co/productos/>

Además se utiliza en productos como cosméticos, lacas, tintas de impresión, lentes de contacto y líquidos de frenos.<sup>45</sup>

- Metoxipropanol: líquido incoloro, transparente, soluble en agua y alcohol. Empleado como solvente, desactivador, retardante en la operación de impresión, acoplante en mezclas de disolventes para artes gráficas, limpiador y emoliente para pesticidas agrícolas.
- Etoxipropanol: líquido incoloro, miscible en agua y soluble en solventes orgánicos. Se utiliza en pinturas, barnices y como retardante de tintas para modelar el secado que sufren estas con los cambios de temperatura.<sup>46</sup>

**1.2.3 Recuperación de solventes.** El manejo de residuos de solvente, que se suele realizar, consiste principalmente en la regeneración y recuperación mediante procesos de separación que se basa principalmente en la separación de la fase homogénea, de acuerdo a la diferencia en la volatilidad relativa como la destilación.<sup>47</sup>

Los solventes que son recuperados y quieren ser reciclados para ser usados en el proceso, como se mencionó anteriormente, se obtienen mediante una separación, que en general es la destilación, donde por diferencia de volatilidades el solvente se recupera en el condensado y los componentes no volátiles, tales como resinas y pigmentos, permanecen en el fondo del equipo.<sup>48</sup>

**1.2.3.1 Fases del proceso de recuperación de los solventes.** El proceso de recuperación de solventes utilizados en la industria flexográfica consiste generalmente en tres fases:

- La primera fase consiste en un tratamiento Inicial, dado que los solventes sucios deben ser sometidos a una separación basado en la diferencia de tamaño de partículas para remover sólidos suspendidos, correspondiente a trazas de tintas, resinas y pigmentos,
- La segunda consiste en someter la mezcla un proceso de separación para mezclas miscibles, con el propósito de separar las mezclas de los solventes y remover las impurezas o contenido de sólidos solubles presentes en ella.
- Una vez separada las fases heterogéneas, se busca mediante un método de separación basados principalmente en técnicas de equilibrio que utilizan una

---

<sup>45</sup>Guía de productos químicos. 2016. Alcoholes. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://guiadeproduktosquimicos.blogspot.com.co/search/label/ALCOHOLES>

<sup>46</sup> TRANSMERQUIM DE COLOMBIA S.A. Ficha de especificación técnica. [Citado el 5 de marzo 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/e/ETOXI%20PROPANOL.pdf>.

<sup>47</sup> SMALLWOOD, Ian M. Solvent Recovery Handbook. Second edition. Blackwell Science. 2002. p. 83-84

<sup>48</sup> ESTRUCPLAN. Tratamientos a solventes. [Citado en marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1857>

sustancia o energía como agente de separación para realizar una separación más específica, es decir, si se tuviera una mezcla de varios solventes, separar unos de otros.

Existen solventes con puntos de ebullición elevados, los cuales son destilados más eficientemente en vacío porque éste tipo de destilación reduce de manera importante cantidad de calor requerido debido a la disminución de presión en el sistema que sería requerido por medio de destilación a presión atmosférica.<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup> Comisión Nacional del Medio Ambiente. (1999). Guía para el control y la prevención contaminación industrial. Manejo de Solventes. [Citado en marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-26264\\_pdf\\_manejo\\_solventes.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-26264_pdf_manejo_solventes.pdf)

### **1.3 MARCO LEGAL**

#### **1.3.1 Decreto 4741 de 2005. Prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos.**

Este decreto reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral con el fin de proteger la salud humana y el ambiente. Además contiene la clasificación, caracterización, identificación, los niveles máximos permisibles en el lixiviado y presentación de los residuos o desechos peligrosos.<sup>50</sup> Siendo de gran importancia para el proyecto porque aporta las bases necesarias para desarrollar el primer objetivo de este, brindando la información suficiente para darle un apropiado manejo y gestión a los residuos de los solventes halogenados , lo cual es fundamental para que sea sostenible con el medio ambiente y para cumplir con las especificaciones mencionadas por aquella normatividad.

#### **1.3.2 Resolución 2309 de 1986. Manejo de residuos sólidos y especiales.**

Esta resolución indica las normas que regulan el manejo de residuos sólidos y especiales, como sustancias inflamables, tóxicas, explosivas, volátiles, entre otros. Se establecen los criterios para identificar los residuos especiales, lineamientos para el correcto almacenaje, transporte, tratamiento, disposición, medidas de seguridad y sanciones por el incorrecto manejo de los residuos.<sup>51</sup>

#### **1.3.3 Ley 1252 de 2008. Normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.**

Esta ley establece lineamientos para el uso y manejo de residuos peligrosos, vigilando la protección de la salud humana y el ambiente, asumiendo la responsabilidad de minimizar la generación de residuos peligrosos en la fuente, optando por políticas de producción más limpia; estableciendo la correcta disposición y eliminación de residuos peligrosos generados.<sup>52</sup>

La importancia de este capítulo radica en la necesidad de tener claridad sobre los fundamentos que abarca la industria flexográfica y el marco legal necesarios para comprender, identificar y realizar un adecuado diagnóstico de la operación de impresión; ya que de ésta resulta el residuo solvente, primordial tanto para el método de recuperación como para su retorno en el proceso.

---

<sup>50</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 4741 (30, 12, 2005). Bogotá D.C.: El ministerio.

<sup>51</sup> Ministerio de Salud. Resolución 2309 (14, 02, 1986). Bogotá D.C.: El ministerio.

<sup>52</sup> Congreso de la Republica de Colombia. Ley 1252 (27, 11, 2008) Bogotá D.C.: El Congreso de Colombia.

## 2. DIAGNÓSTICO

En el siguiente capítulo se describe el proceso productivo de la empresa, con el fin de realizar un diagnóstico al proceso, se establecieron las principales características, uso aplicado a la industria y propiedades de los solventes utilizados, además se muestra el desarrollo experimental utilizado para caracterizar, conocer la composición de las sustancias involucradas en el proceso y la composición del residuo solvente, las pruebas gravimetría, humedad y cromatografía del residuo fueron realizadas en el Centro de Gestión Industrial SENA, mientras que las cromatografías de las materias primas fueron realizadas por la empresa Tintas S.A. a condiciones de 105°C.

### 2.1 SOLVENTES UTILIZADOS EN EL PROCESO

Los solventes son muy importantes para llevar a cabo el proceso de impresión, porque son los encargados de disolver y conservar la resina líquida dentro de la tinta. De aquí radica la importancia de conocer el tipo de resina de la tinta, porque de acuerdo a esto, se definen los solventes que pueden mantenerla estable. En la empresa se utiliza generalmente la resina nitrocelulosa, la cual es disuelta principalmente por acetato de propilo y alcoholes como etanol y propanol, de aquí radica la importancia de estos dos solventes.<sup>53</sup>

Los alcoholes son utilizados como solventes dadas sus propiedades físicas, se caracterizan por su estructura, porque está conformada por un grupo lipófilo, del tipo de un alcano, y un grupo hidroxilo que es hidrófilo, es decir es afín al agua. De estas dos unidades estructurales, el grupo OH da a los alcoholes sus propiedades físicas características, y el alquilo es el que las modifica, dependiendo de su tamaño y forma. Además este grupo, por su polaridad, tiene la capacidad de establecer puentes de hidrógeno con sus moléculas compañeras y con otras neutras.<sup>54</sup>

Los solventes empleados en la Empresa Golden Flex S.A. son Solflex MP compuesto por propanol y un éster del ácido acético, Solflex EP conformado por propanol, etanol y n-propil acetato y finalmente, el metoxipropanol que contiene metoxipropanol y propanol, estos solventes se utilizan en una proporción 80% alcoholes y 20% esterres (Véase anexo A). Estos solventes son utilizados en el proceso de dilución de tintas y además en el lavado de los equipos de impresión, más adelante se profundizará sobre el proceso mencionado.

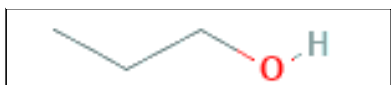
---

<sup>53</sup> GUERRERO, Julio Iván. Director técnico comercial tintas. Industrias Lember S.A. Bogotá, Colombia. 2017

<sup>54</sup> MORRISON, Robert T. y BOYD, Robert N.. Química orgánica. Quinta edición. Boston: Allyn and Bacon. 1998. p 167.

**2.1.1 Propanol.** También conocido como alcohol de propilo, n-propanol, es un líquido incoloro que se obtiene principalmente por la oxidación de hidrocarburos alifáticos, utilizado como disolvente en la limpieza y desengrase de equipos, en la formulación de tintas o en la fabricación de gran variedad de productos como lacas, pinturas y recubrimientos.<sup>55</sup> En la tabla 1 se observan algunas propiedades del propanol.

**Figura 1.** Estructura propanol.



**Fuente:** Pubchem. 1-Propanol. [Citado febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1031#section=2D-Structure>

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas propanol

Propiedades	Valor
Fórmula química	$C_3H_8O$
Punto de ebullición.(°C)	97
Punto de inflamación.(°C)	23
Temperatura de autoignición.(°C)	412
Punto de fusión.(°C)	-127
Peso molecular.(g/mol)	60,1
Índice de refracción. (20°C)	1,3862
Densidad relativa de vapor (aire=1)	2,2
Densidad relativa (agua=1)	0,79
Presión de vapor. (hPa,20°C)	18,7

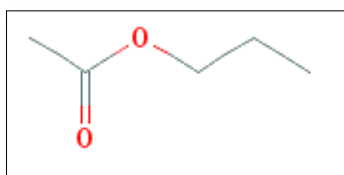
**Fuente:** Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S Pubchem.1-propanol. [Citado en febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1031>

El propanol dentro de sus características principales se encuentra que es una sustancia polar, presenta una baja viscosidad además de ser miscible en agua y en otros alcoholes, es un compuesto semi volátil debido a que tiene un punto de ebullición intermedio al comparar con los demás componentes que integran el proceso.

<sup>55</sup> Pubchem. [Base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, marzo 2005, 1-propanol [Citado en febrero 2017]. Disponible por internet <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1031>

**2.1.2 N-propil acetato (NPA).** También conocido como acetato de propilo, ácido acético de éster propílico o acetato de propilo. Se utiliza en la dilución de tintas poliuretánicas para la impresión de todo tipo de empaques en la industria flexográfica y rotograbado. Al ser una sustancia con una tasa de evaporación alta.<sup>56</sup> A continuación, en la tabla 2 se muestran propiedades fisicoquímicas del NPA.

**Figura 2.** Estructura del N-Propil acetato (NPA).



**Fuente:** Pubchem. Propyl Acetate. [Citado febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7997#section=2D-Structure>

**Tabla 2.** Propiedades fisicoquímicas de NPA

Propiedad	Valor
Fórmula química.	$C_5H_{10}O_2$
Punto de ebullición. (°C)	101,6
Punto de inflamación. (°C)	144
Temperatura de autoignición. (°C)	450
Punto de fusión. (°C)	-92,5
Peso molecular. (g/mol)	102,133
Pureza con cromatografía (%p/p)	98,0
Pureza por cromatografía de gases.	99,5
Densidad relativa (agua=1)	0,89
Presión de vapor. (mmHg,20°C)	25

**Fuente:** Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S Pubchem. N-propil acetato [Citado en febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7997#section=Top>

**2.1.3 Etanol.** También conocido como alcohol etílico, alcohol desnaturalizado o simplemente alcohol es un líquido volátil, claro, incoloro; que se obtiene industrialmente por la fermentación de carbohidratos.<sup>57</sup> Es un líquido incoloro con olor característico que tiene actividad bactericida y se utiliza a menudo como un desinfectante tópico. Es ampliamente utilizado como solvente de resinas en la

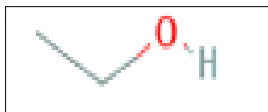
<sup>56</sup> Pubchem [base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, marzo 2005 N-propil acetato. [Citado en febrero 2017]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7997#section=Top>

<sup>57</sup> CHEREMISINOFF, Nicholas. Industrial Solvents Handbook. Rockville, Maryland. 2003. p 103.



industria de impresión flexográfica.<sup>58</sup> En la tabla 3 se observan algunas propiedades del etanol.

**Figura 3.** Estructura del etanol.



**Fuente:** Pubchem. Ethanol. [Citado febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/702#section=2D-Structure>.

**Tabla 3.** Propiedades fisicoquímicas del etanol

Propiedad	Valor
Fórmula química	$C_2H_6O$
Punto de ebullición(°C)	78,25
Punto de inflamación. (°C)	13
Temperatura de autoignición (°C)	363
Punto de fusión (°C)	-114,4
Peso molecular (g/mol)	46,07
Índice de refracción.	1,3617
Densidad relativa de vapor (aire=1)	1,59
Densidad relativa (g/ml)	0,789
Presión de vapor. (mm Hg 25°C)	59,3

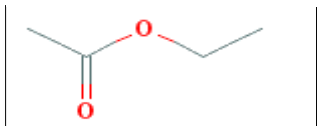
**Fuente:** Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S Pubchem. Ethanol. [Citado en febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/702#section=Top>

**2.1.4 Acetato de etilo.** Conocido en la industria como etanoato de etilo, éter acético o nafta de vinagre, se encuentra en las bebidas alcohólicas, en cultivos de cereales, rábanos, jugos de frutas, cerveza, vino, bebidas espirituosas, entre otros.<sup>59</sup> Es un solvente que tiene un olor y sabor afrutado, líquido volátil incoloro, se disuelve en agua y se evapora rápidamente tanto de la superficie del agua como del suelo por su alta velocidad de secado debido a su baja temperatura de ebullición (Ver Tabla 4).

<sup>58</sup> Pubchem [Base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, septiembre 2004. Ethanol [Citado en febrero 2017]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/702#section=Top>

<sup>59</sup> Pubchem [Base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, septiembre 2004. Ethyl acetate [ citado en febrero 2017]. Disponible por internet <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8857>

**Figura 4.** Estructura del acetato de etilo.



**Fuente:** Pubchem. Ethyl acetate. [Citado febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8857#section=2D-Structure>

Además el acetato de etilo, es un compuesto miscible con etanol, acetona, éter de etilo<sup>60</sup> Este éster por tener tasa de evaporación alta será el que primero se va de la superficie para que la tinta tenga un buen desempeño<sup>61</sup>. Se utiliza como disolvente para limpieza o desengrasado, aditivo de recubrimiento y pigmentos.<sup>62</sup>

**Tabla 4.** Propiedades fisicoquímicas del acetato de etilo

Propiedad.	Valor.
Fórmula química	$C_4H_8O_2$
Punto de ebullición(°C)	77,1
Punto de inflamación (°C)	-4
Temperatura de autoignición (°C)	427
Punto de fusión (°C)	-83,8
Peso molecular ( g/mol)	88,106
Índice de refracción.	1,3704
Densidad relativa de vapor (aire=1)	3,04
Densidad (g/cm <sup>3</sup> , 25°)	0,894
Presión de vapor. (mm Hg 25°C)	93,2
Gravedad específica (20°C)	0,9019
Pureza (%m/m)	90,50

**Fuente:** Pubchem. Ethyl acetate. [Citado febrero 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8857#section=Top>

Como se mencionó anterior mente, dadas las características del tipo de resina que se utiliza en la empresa, cabe resaltar que igualmente debido a su naturaleza, este tipo de resina (nitrocelulosa) solamente es disuelta por acetato de etilo.

<sup>60</sup>Toxnet. [Base de datos en línea]. Toxicology data network.U.S, septiembre 2014. Ethyl acetate [Citado abril 2015]. Disponible en: <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-in/sis/search2/r?dbs+hsdb:@term+@rn+@rel+141-78-6>

<sup>61</sup> Nova Report. [Boletín informativo en línea]. Edición 1. Bogotá D.C, 2003. [Citado en marzo de 2003]. Disponible en: <http://novaflex.com.co/wp-content/uploads/2016/09/Novareport-206.pdf>

<sup>62</sup> Pubchem [Base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, septiembre 2004. Ethyl acetate [Citado en febrero 2017]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8857#section=Top>

**2.1.5 Metoxipropanol.** Conocido también como 1-metoxi 2-propanol, acetato de metoxipropanol o acetato de metoxipropilo.<sup>63</sup> Es un líquido incoloro, con un olor dulce parecido al éter, es soluble en agua y en diferentes solventes orgánicos. Se utiliza en la industria flexográfica como retardante en el proceso de impresión, para ajustar la velocidad de secado de las tintas cuando esta es rápida.<sup>64</sup> También se emplea como disolvente de pinturas, lacas, resinas, aceites y grasas.<sup>65</sup> En la tabla 5 se muestran propiedades fisicoquímicas del metoxipropanol.

**Tabla 5.** Propiedades fisicoquímicas del metoxipropanol

Propiedad	Valor
Fórmula química	$C_4H_{10}O_2$
Punto de ebullición(°C)	120,1
Punto de inflamación. (°C)	31,5
Temperatura de autoignición (°C)	270
Punto de fusión (°C)	-95
Peso molecular (g/mol)	90,12
Índice de refracción.(20°C)	1,4034
Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> ,20°C)	0,92
Presión de vapor. (hPa 25°C)	17,1

**Fuente:** Aspen HYSYS V8.6 Methoxypropanol. Aspen technology.2015. System requirements: 2,22 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM. [Citado en febrero 2017].

Los solventes son considerados parte importante en la formulación de las tintas, porque no solamente son los encargados de diluirlas, sino que aportan características especiales al proceso y controlan propiedades como la fluidez, la viscosidad, entre otros. Dentro del proceso de impresión, las tintas los solventes son responsables de que la tinta; no presente precipitación de la resina, haya buena transferencia al sustrato, humedecer de manera permanente la plancha, evitar que se genera repise en el producto impreso.<sup>66</sup>

Dentro del proceso de impresión en la empresa, se utilizan 3 tipos de mezcla de solventes:

<sup>63</sup> Pubchem [Base de datos en línea]. Chemistry database. National center for biotechnology information. U.S, Methoxypropanol. octubre 2005 [citado en febrero 2017]. Disponible en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3032390#section=Top>.

<sup>64</sup> LEMBER S.A. Certificado de análisis de calidad. Segunda edición. Cali, Colombia: LEMBER S.A. 2004. p. 6.

<sup>65</sup> INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional del 1-Metoxipropanol, 17 Ed. España, 2009. p. 1.

<sup>66</sup> Novaflex. Solventes en la impresión flexográfica. [Citado el 15 de agosto de 2017]. [en línea]. Disponible en: <http://novaflex.com.co/wp-content/uploads/2016/09/Novareport-206.pdf>

- Metoxipropanol, compuesto por 1metoxi 2 propanol 99,5% y propanol, el cual actúa como retardante de las tintas durante el secado, se emplea cuando esté es rápido dadas las condiciones ambientales.
- Solflex MP, compuesto por aceto de etilo 68-72% y propanol 28-32%, se utiliza como acelerante en el secado de las tintas.
- Solflex EP, compuesto por etanol, propanol 87-82% y NPA 18-22%, se emplea en la disolución de las resinas y en mezcla con el solvente recuperado para la limpieza de las unidades de impresión.

Como se mencionó en la justificación del proyecto, la empresa busca un beneficio de carácter económico y en la eficiencia en el proceso de producción. Debido a que la planta carece de un sistema de recuperación del residuo líquido generado durante el proceso de impresión, el uso que se le daría al recuperado principalmente es para diluir las tintas y el lavado de unidades de las impresoras.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

GOLDEN FLEX S.A. es una empresa ubicada en la Zona Franca de Fontibón en Bogotá y está dedicada a la conversión de empaques plásticos en cuanto a la fabricación, comercialización y distribución de productos monocapas y laminados para el sector alimentos, industrial, correos y publicitarios.

Dentro de su producción intervienen procesos de extrusión, impresión, laminación, refilado, doblado y sellado. Es necesario aclarar que dentro del proceso de impresión se encuentra el lavado de los equipos.

En el proceso de extrusión se hace la conversión de resinas de polietileno de baja densidad (PEBD), alta densidad (PEHD) y polietilenos lineales (PELL) en película, esta es utilizada tanto en la impresión como en el proceso de laminación. Dicha película es sometida a un proceso de tratamiento corona, el cual permite que las tintas se adhieran a ella. En este proceso ingresan 40.000 kg/mes, donde se genera un desperdicio de aproximadamente el 2% el cual es peletizado y se ingresa a otros dos procesos de la compañía (impresión y laminación). Para impresión, se cuenta con dos máquinas impresoras flexográficas de 8 y 6 colores que utilizan tintas cuyos solventes son solflex MP, solflex EP y metoxipropanol. Ingresan en este proceso aproximadamente 4.500 kg/mes de tintas para imprimir aproximadamente 12.000 kg de polietilenos, 4.800 kg de polipropilenos, 5000 kg de poliéster y 10.000 kg de termoencogibles al mes. Como agentes diluyentes de las tintas se utilizan 3005 kg de solflex EP, 150 kg de solflex MP (acelerante de secado) y 190 kg de metoxipropanol (retardante de secado) por mes (ver fichas técnicas), los cuales son la herramienta fundamental para darle un adecuado manejo a las tintas y un buen desempeño sobre los sustrato<sup>67</sup>.

---

<sup>67</sup> LÓPEZ, Germán. Director de producción. Golden Flex S.A. Bogotá, Colombia.2017.

El sistema de secado de tintas se hace con resistencias eléctricas que por medio de un ventilador transporta aire caliente entre 55 y 75 °C a cada unidad de impresión y a una estación de secado a la salida de la máquina, la temperatura del túnel de secado depende de las condiciones atmosféricas (6-28 °C), la velocidad de impresión (60 -200 m/min) y la viscosidad dinámica de la tinta (18-30 seg) es medida con copa Zahn número 2. Mientras que las condiciones óptimas de trabajo de las tintas están entre 22 y 24 seg.

Los solventes a recuperar son producto del lavado de cada unidad de impresión cuando se va a hacer cambio de referencias ya que no siempre los colores coinciden en las unidades. Por lo cual, se utilizan las mismas bombas de las tintas para poner a recircular solvente recuperado en promedio 833,88 kg/mes y 601 kg/mes de solflex EP, para limpieza de bombas, rodillos, cámaras de tintas, canales y las mangueras internamente. Una vez el solvente producto de la limpieza está sucio es depositado en canecas de 55 galones; posteriormente la empresa INDUSTRIA QUÍMICA FIQ LTDA, recoge el residuo líquido para hacer el proceso de recuperación de dichos solventes. Aproximadamente se envían a recuperar unos 1191,25 kg/mes de los cuales en el proceso se recupera el 70%.

La limpieza externa de rodillos, derrames y limpieza de canales se realiza con trapos sintéticos de tela utilizando solflex EP. Esta limpieza genera aproximadamente 217 kg/mes que son determinados como residuos peligrosos y son tratados por la empresa PROSARC S.A. ESP quien da disposición final a partir de un tratamiento térmico, mediante sistemas de enfriamiento y depuración de gases que trabajan con temperaturas que oscilan entre (850-1200)°C, estos sistemas generan emisiones atmosféricas dentro de los estándares permisibles, quedando del procedimiento un residuo consistente en cenizas calcinadas y como empresa registrada ante el Ministerio de Medio Ambiente, soporta dicha disposición con un certificado<sup>68</sup>.

En el proceso de laminación ingresan aproximadamente 38.000 kg/mes de la siguiente forma: lámina de polietileno 28.000 kg, poliéster 5.000 kg, polipropileno 4.000 kg y aluminio 1.000 kg al mes. En este proceso quedan 300 kg/mes con respecto a los sobrantes de polietileno que son utilizados para futuros pedidos y 200 kg/mes de desperdicios de laminación que no son recuperables por contener materias primas de diferentes características y no compatibles, dichos residuos son depositados en la basura la cual es recolectada por el operador de la Zona Franca.

En el proceso de refilado y doblado se cortan los sobrantes laterales de las láminas que es de aproximadamente 1 cm y se generan los rollos con destino al cliente o a la sección de sellado. A este proceso ingresan unos 35.000 kg/mes de los cuales se genera entre un 5 y 10% máximo de desperdicio producto de fallas de impresión,

---

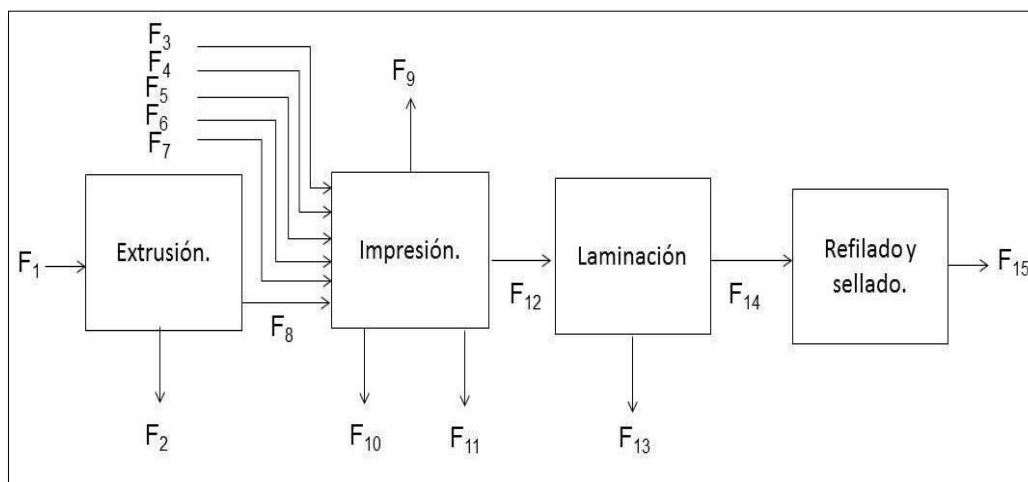
<sup>68</sup> PROSARC S.A. ESP. Certificado tratamiento térmico. Resolución 058 (01, 01, 2002). Licencia ambiental. Resolución 3077 (01, 11, 2006).

laminación, y del mismo refilado como tal. Algunos desperdicios son vendidos para peletizar y ser utilizados en otros procesos industriales.

Finalmente, al proceso de sellado ingresan aproximadamente 15.000 kg/mes para los diferentes tipos de bolsas solicitadas por los clientes. El resultado de este proceso es de unos 14.000 kg/mes debido a los desperdicios por cuadro de máquina y defectos retirados, generados por los procesos anteriores.

El uso de los solventes para la dilución de tintas, viene definido de acuerdo a los parámetros establecidos por la compañía y proveedores de tintas, esto se hace basado en el tipo de resina para las tintas porque de la selección del solvente depende el desempeño de la tinta en el sustrato, en general la proporción de solventes para este uso es propanol 80% y NPA 20%. Sin embargo, como se mencionó anteriormente los solventes también se pueden utilizar para el lavado de las unidades de impresión en proporciones de solvente recuperado 80% (ver numeral 2.3.2.1) y 20% solflex EP

**Figura 5.** Proceso de producción Golden Flex S.A.



En la figura 5 se muestra un esquema general del proceso productivo de la empresa y en la tabla 6 se indica a que corresponde cada flujo de la figura 5.

**Tabla 6.** Flujos de proceso.

Corriente	Tipo de corriente	Nombre
F <sub>1</sub>	Entrada-Materia prima	Polietileno para extrusión
F <sub>2</sub>	Salida-Residuo	Desperdicio de extrusión
F <sub>3</sub>	Entrada-Materia prima	Tintas prelistadas
F <sub>4</sub>	Entrada-Materia prima	Solflex MP

**Tabla 6.** (Continuación)

<b>Corriente</b>	<b>Tipo de corriente</b>	<b>Nombre</b>
F <sub>5</sub>	Entrada-Materia prima	Solflex EP
F <sub>6</sub>	Entrada-Materia prima	Metoxipropanol
F <sub>7</sub>	Entrada-Materia prima	Solvente recuperado
F <sub>8</sub>	Entrada-Materia prima	Sustratos para impresión
F <sub>9</sub>	Salida-Residuo	Residuo gaseoso del proceso de impresión.
F <sub>10</sub>	Salida-Residuo	Trapos sintéticos contaminados.
F <sub>11</sub>	Salida-Residuo	Residuo líquido de impresión.
F <sub>12</sub>	Salida-Producto.	Producto impreso.
F <sub>13</sub>	Salida-Residuo	Residuo sólido de laminación
F <sub>14</sub>	Salida-Producto.	Producto laminado
F <sub>15</sub>	Salida-Producto.	Producto refilado y sellado.

## 2.3 CARACTERIZACIÓN

La caracterización del residuo, se realizó mediante la técnica analítica cromatografía de gases, que fue seleccionada mediante una comparación cualitativa, donde se tomaron diferentes técnicas analíticas aplicables a la muestra (Véase anexo B) se estableció que es la técnica más utilizada y que por su eficacia para el análisis, limitada a compuestos orgánicos volátiles y estables térmicamente, es una técnica que ofrece alta sensibilidad, detección selectiva y elevada eficiencia en la separación. Además, por ser la única técnica que ofrecía facilidades respecto a recursos técnicos, tecnológicos y económicos.

Sin embargo se realizó una cromatografía de gases acoplada a espectrómetro de masas (CG-EM), para identificar los componentes que integran el residuo solvente y efectuar análisis tanto cuantitativo como cualitativo, debido a que esta combinación permite que el cromatógrafo de gases separe los componentes de la mezcla y que posteriormente sean identificados por su espectro de masas<sup>69</sup>.

<sup>69</sup> LÓPEZ, Juan. Estandarización de la técnica de cromatografía de gases, acoplada a espectrometría de masas para la identificación y cuantificación de metilésteres de ácidos. Universidad tecnológica de Pereira. Escuela de química, 2008.

**2.3.1 Muestreo.** La toma de las muestras corresponde a una muestra representativa, según la NTC 1052 Pinturas, barnices y materias primas, muestreo<sup>70</sup>. Es una muestra puntual o simple por lo que se tomó en el mismo lugar y hora. (Véase anexo C). También se tuvo en cuenta la NTC-ISO 3951-1 Procedimientos de muestreo para inspección por variables<sup>71</sup>, NTC-ISO 2859-1 Procedimientos de muestreo para inspección por atributos<sup>72</sup> y NTC 4711 Muestreo de residuos y suelos para análisis de constituyentes orgánicos volátiles<sup>73</sup>, para realizar de forma adecuada el muestreo.

Para ello, se tomó una muestra de 40L del residuo líquido que se encontraba distribuido en 4 canecas con una capacidad de 55 galones (208,2 L) cada uno. Para tomar la muestra de residuo solvente se utilizó una pipeta de 10mL, midiendo 10 mL respectivamente y se depositaron en dos garrafas de polietileno con una capacidad de 20 L, que se almacenaron en una bodega que cumplía con la mayoría de recomendaciones indicadas en el plan de muestreo (Ver anexo C). Previamente se agitó el residuo contenido en las 4 canecas para mantenerlo lo más homogeneizado posible y de esta manera realizar un adecuado muestreo.

**2.3.2 Análisis de la muestra.** Se realizó la caracterización del residuo solvente resultante de la operación de lavado, a las materias primas, residuo líquido y recuperado del residuo (tratado por Industrias químicas FIQ LTDA) con el fin de obtener un diagnóstico tanto del residuo como del proceso, porque con ello se pueda tener claridad sobre las condiciones y componentes que intervienen en la operación de impresión, para posteriormente seleccionar la alternativa que más se ajuste a lo mencionado anteriormente.

**2.3.2.1 Cromatografía de gases.** La cromatografía de gases es una técnica de separación física basada en la diferencia de velocidad de migración. En ésta los componentes de la mezcla los componentes de la mezcla se mueven a través de un lecho mediante flujo continuo de un gas o líquido que se convierte en fase móvil, la separación de los componentes de alimentación entre la fase móvil y estacionaria se efectúa por la diferencia de velocidades de migración.<sup>74</sup>

La empresa Tintas S.A, efectuó la cromatografía de gases para cada materia, el recuperado y el residuo solvente, para la cual se requirieron 20 mL respectivamente,

---

<sup>70</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Pinturas, barnices y materias primas. Muestreo. NTC 1052. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008.

<sup>71</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Procedimientos de muestreos para inspección por variables. NTC-ISO 3951-1. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008.

<sup>72</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Procedimientos de muestreos para inspección por atributos. NTC-ISO 2859-1. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008.

<sup>73</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Muestreo de residuos y suelos para análisis de constituyentes orgánicos volátiles. NTC 4711. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005.

<sup>74</sup> MONTOYA, Sergio; PÁEZ, Carlos. Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos. Programa de tecnología química. Pereira, 2012.



estas muestras se almacenaron en 5 recipientes ámbar de 200 mL cada uno y el protocolo se indicó en el anexo D.

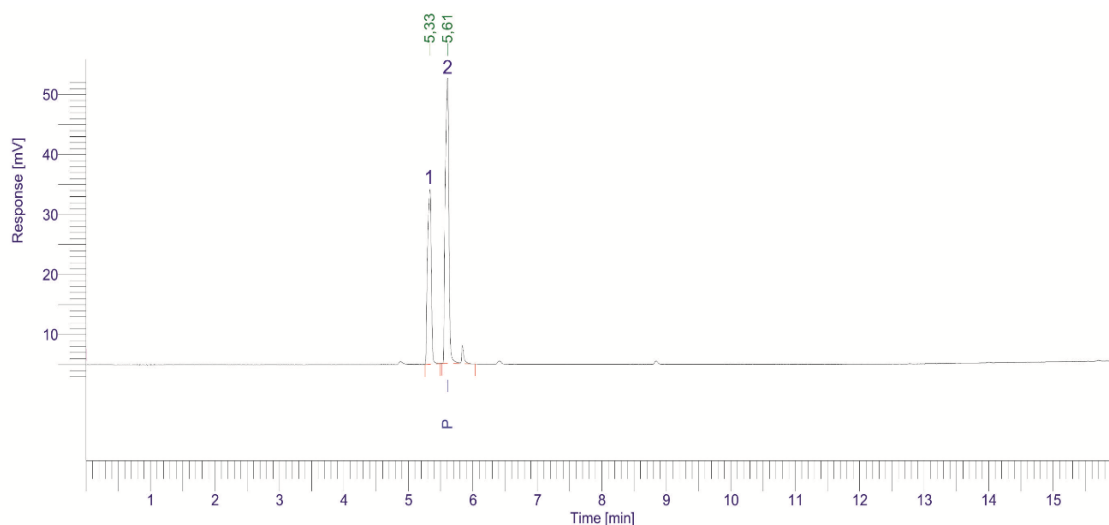
A continuación, se presentan las principales características y condiciones que se utilizaron en la cromatografía de gases y acoplada a masas para la identificación de sus diferencias en los datos, por lo cual en sus respectivos resultados se evidenciará discrepancias, las anteriores técnicas se basaron en la NTC 5013- grasas y aceites vegetales y animales análisis de los ésteres metílicos de ácidos grasos por cromatografía de gases.

**Cuadro 1.** Condiciones de operación de los equipos de CG y CG-EM

Condición	Cromatografía de gases (CG)	Cromatografía de gases (CG-EM)
Tipo de columna.	Perkin Elmer Autosystem XL PE-5	MS GCMS-QP 2010
Fase móvil.	H <sub>2</sub> , aire, He	Helio
Fase estacionaria	Dimethyl posiloxane	Polietilenglicol en fase polar
Cantidad de muestra.	1,5 mg <sup>+1</sup>	10 µL
Tipo de inyección.	Headspace	Split o división.
Temperatura operación	105°C	250°C
Presión de operación.	3447,37 kPa	77 kPa
Diámetro	25 cm	22 cm
Longitud	60cm	50 cm

A continuación, se muestran los resultados de las cromatografías de gases realizadas tanto a la materia prima como del residuo, se lograron obtener los siguientes resultados.

**Gráfica 1.** Cromatograma materia prima solflex MP

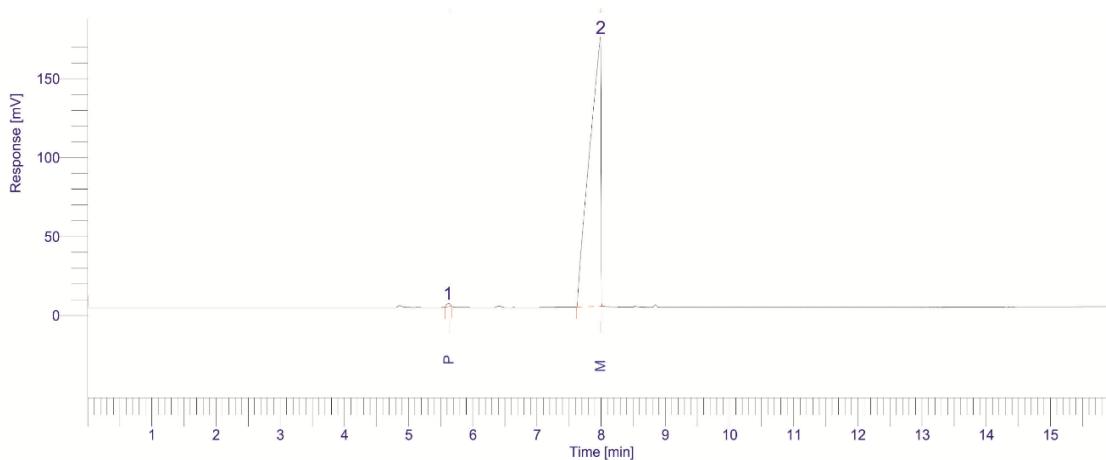


**Tabla 7.** Resultados cromatografía de gases materia prima Solflex MP.

Pico	Componente.	Tiempo ret. (min)	Área (uV*sec)	Composición (%)
1	Desconocido	5,701	344834,87	56,24
2	Propanol.	5,986	279042,20	43,76

Al cotejar la ficha técnica del Solflex MP (Véase anexo A) con los resultados obtenidos por las dos primeras cromatografía de gases (Véase anexo E) en los meses de marzo y mayo de este año, se puede afirmar que éste solvente solamente contiene propanol y una serie de componentes desconocidos, es decir, no cumple con las especificaciones dadas por la ficha técnica en cuanto a la composición del alcohol y éster del ácido acético dados en porcentaje masa/masa, lo cual puede repercutir en que haya deficiencia para compensar la falta de NPA y acetato de etilo que se emplean durante el proceso de impresión, debido a que las composiciones de estos compuestos varían por las condiciones ambientales; debido a que los picos mostrados en la primera y segunda cromatografía (Véase anexo E) estaban muy pegados lo que implicó que no hubiera una buena identificación, por lo cual se repitió la cromatografía de gases para este solo compuesto en la misma empresa (Tintas S.A.). En ésta, se evidencio que se trata de una mezcla variable con proporciones de 56,24% y 43,76 % de una sustancia desconocida y propanol (Véase Tabla 7) mostrados en los picos uno y dos respectivamente (Véase Gráfica 1), siendo esta tercera cromatografía la que tiene las composiciones correctas respecto al área; sin embargo, no cumple con las especificaciones de la ficha técnica en relación a las composiciones.

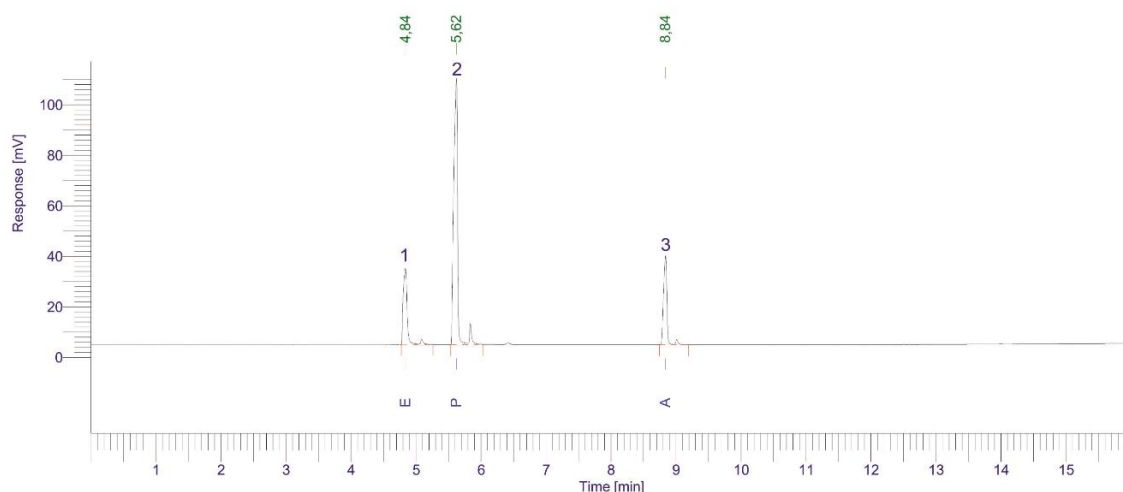
**Gráfica 2.** Cromatograma materia prima Metoxipropanol.



**Tabla 8.** Resultados cromatografía de gases materia prima Metoxipropanol.

Pico	Componente.	Tiempo ret. (min)	Área (uV*sec)	Concentración (%)
1	Propanol	5,629	8100,48	0,23
2	Metoxi Propanol	7,990	2099616,37	99,77

Con respecto a los resultados del metoxipropanol (tabla 8), se realizó una comparación similar a la mencionada anteriormente con la ficha técnica respectiva (Véase anexo A) en cuanto a la concentración, lo que permite afirmar que se cumple con las especificaciones; ya que la composición es mayor al 99,5% respecto del 1metoxi-2 propano mostrado en el pico dos , mientras que de propanol es menor al 0,5% mostrado en el pico uno de la gráfica 2 ,lo que le da la propiedad de ser buen retardante de las tintas cuando la velocidad de secado sea rápida por las condiciones ambientales.

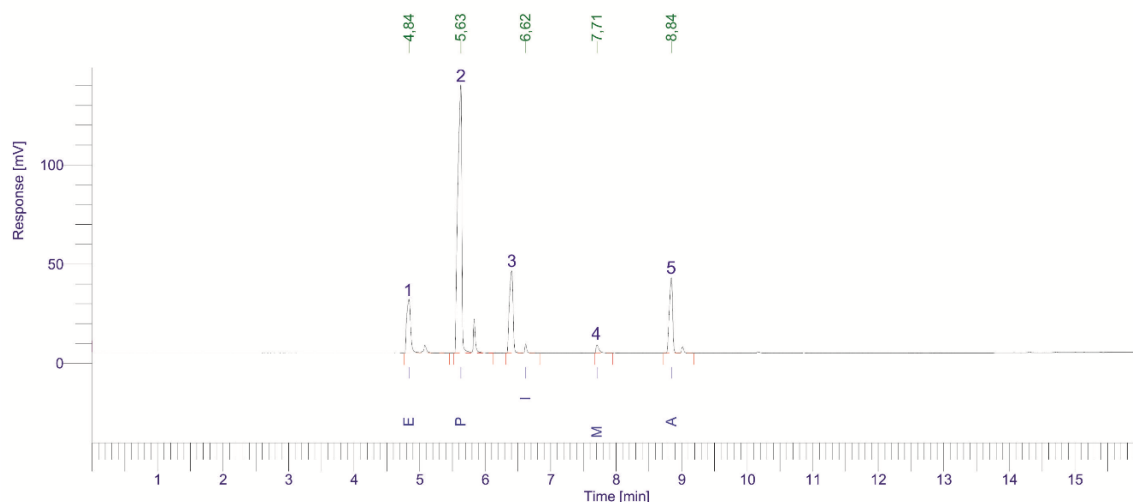
**Gráfica 3.** Cromatograma materia prima solflex EP**Tabla 9.** Resultados cromatografía de gases materia prima Solflex EP

Pico	Componente.	Tiempo ret. (min)	Área (uV*sec)	Concentración (%)
1	Etanol	4,836	129832,78	21,59
2	Propanol.	5,623	443940,51	59,05
3	Acetato de N-propilo	8,838	128417,48	19,36

Con el solvente Solflex EP, los resultados de la cromatografía de gases (tabla 9) evidencian que se está cumpliendo con los rangos de composición establecidos en la ficha técnica del solflex EP (Anexo A), debido a que la mezcla de alcoholes se encuentra dentro del rango (78-82) %m/m mostrados en el pico uno y dos; mientras

que el éster de ácido acético entre (18-22) %m/m reflejado en el pico tres de la gráfica 3, siendo un eficaz disolvente para las soluciones de tintas flexográficas.

**Gráfica 4.** Cromatograma solvente recuperado.



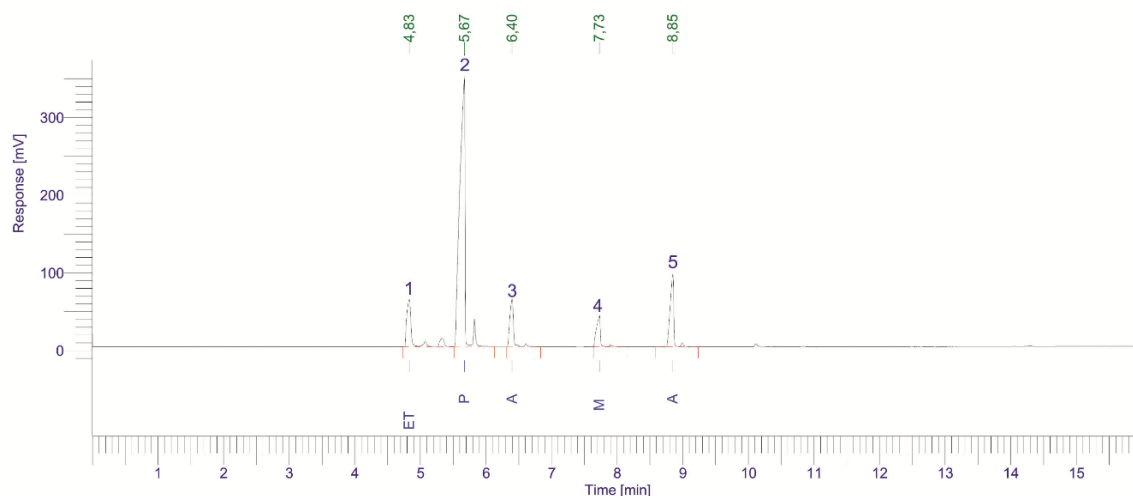
**Tabla 10.** Resultados cromatografía de gases solvente recuperado.

Pico	Componente.	Tiempo ret. (min)	Área (uV*sec)	Concentración (%)
1	Etanol	4,837	129673,30	14,72
2	Propanol.	5,629	607078,53	55,13
3	Isobutanol.	6,617	171692,44	13,43
4	Metoxi propanol.	7,707	13927,14	2,11
5	Acetato de N-propilo	8,842	141952,18	14,61

En los resultados dados en la tabla 10, se evidenció la presencia de isobutanol mostrado este compuesto en el pico tres de la gráfica 4, compuesto que no ingresa en el proceso de impresión como componente de las materias primas, lo cual permite deducir que la empresa INDUSTRIA QUÍMICA FIQ LTDA, quien realiza la recuperación del residuo líquido solvente, efectúa el proceso de destilación con remanentes posiblemente provenientes de otras empresas, la presencia de este compuesto puede traer efectos negativos, porque el uso de este recuperado en la operación de impresión, por ser una sustancia pesada para las tintas hace que sea difícil de eliminar en la impresión y puede causar defectos en esta operación como repise (Ver Glosario); por lo cual sería mejor que la empresa Golden Flex S.A contará con un proceso de recuperación interno que sólo utilizara el residuo solvente generado para tener compuestos deseados que fueran convenientes con las materias primas o sustratos empleados, evitando la contaminación cruzada y para garantizar calidad del retorno en la operación de impresión. Mientras que los otros

componentes reflejados en los picos uno, dos, cuatro y cinco de la gráfica cuatro si son deseados para la operación de impresión

**Gráfica 5.** Cromatograma residuo líquido por análisis de cromatografía de gases



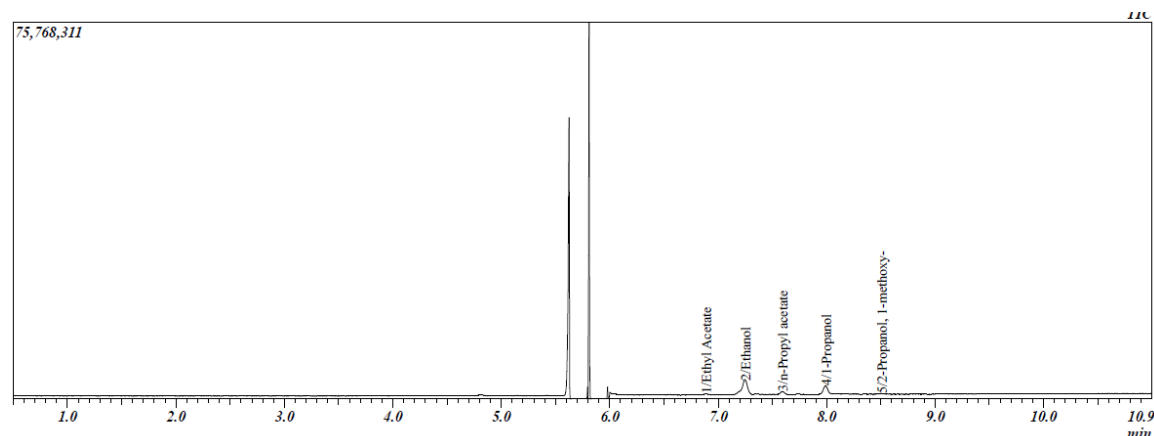
**Tabla 11.** Resultados de la cromatografía de gases del residuo líquido.

Pico	Componente.	Tiempo ret. (min)	Área (uV*sec)	Concentración (%)
1	Etanol	4,832	334840,97	12,55
2	Propanol.	5,671	1960181,64	58,16
3	Acetato de etilo.	6,398	235276,57	9,06
4	Metoxi propanol.	7,730	166906,79	8,28
5	Acetato de N-propilo	8,847	355395,35	11,95

Se evidenció que el propanol y etanol son los componentes mayoritarios reflejados en los picos uno y dos, mientras que los minoritarios son el acetato de etilo, metoxi propanol y acetato de n-propilo mostrados en los picos 3,4 y 5 respectivamente de la gráfica 5, los cuales integran el residuo líquido resultante del proceso de impresión, siendo la mezcla mencionada anteriormente favorable tanto para la dilución de tintas como para la operación flexográfica.

Por otra parte, se realizaron análisis adicionales en el Centro de Gestión Industrial del Sena correspondientes a la cromatografía de gases acoplada a masas, para este análisis el volumen tomado de la muestra fue de 10  $\mu$ L, que fueron llevados a un volumen de 10 mL con ciclo hexano, en el anexo D se encuentra el protocolo empleado y las condiciones con las que se llevó a cabo la cromatografía.

**Gráfica 6.** Cromatograma residuo líquido por análisis de CG EM



**Tabla 12.** Resultados CG EM del residuo líquido

Sustancia	Peso molecular g/mol	Concentración masa (%)	Concentración molar (%)
Propanol	60,10	34,22	31,71
Etanol	46,07	47,97	57,99
N-propil acetato	102,13	10,63	5,80
Acetato de etilo	88,11	4,54	2,87
1-Metoxi 2-propanol	90,12	2,64	1,63

Los resultados mostrados en la gráfica 6 y tabla 12 permite identificar los componentes presentes en la mezcla, se identifican 5 sustancias; etanol, propanol, acetato de etilo, n-propil acetato y 1-Metoxi 2-propanol, los resultados de esta prueba, se pueden ver con más detalle en el anexo F, estos cinco componentes se encuentran dentro de las sustancias que hacen parte de la materia prima del proceso de impresión (Ver grafica 1, 2 y 3).

**2.3.2.2 Contenido de sólidos.** Para determinar el contenido de sólidos totales se realizó un análisis de gravimetría, con el fin de establecer si se requiere o no una separación sólido-líquido. Dicha prueba fue realizada por el Centro de Gestión Industrial Sena, el protocolo llevado a cabo se muestra en el anexo G y se basó este experimento en la NTC 762-Pinturas, disolventes, determinación de la materia no volátil<sup>75</sup>. En la tabla 13, se muestran los resultados de la prueba.

<sup>75</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Pinturas, disolventes, determinación de la materia no volátil. NTC 762. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1974.

**Tabla 13.** Contenido de sólidos totales del residuo solvente.

<b>Parámetro.</b>	<b>Sólidos (%)</b>	<b>Sólidos experimentales (mg/g)</b>
Sólidos (%)	4,7573	47,5733
Varianza. (sx)	0,0341	0,3412
Desviación estándar relativa (RSD)	0,7172	0,7172

En la prueba de gravimetría se eliminó el agua y se evidenció que se trata de una muestra sobresaturada de sólidos en la cual hay un contenido de sólidos totales equivalente a un 4,76%; en su mayoría son sólidos solubles y algunos no se disuelven, por ello sólo se determinaron los sólidos totales; ya que, debido al estado coloidal de la muestra, surge la necesidad de emplear solamente un método de separación homogéneo.

Además, se garantiza la precisión de los resultados (Anexo G) con la desviación típica y la desviación estándar relativa de las tres muestras.

**2.3.2.3 Contenido de humedad.** Para cuantificar el contenido de agua presente en el residuo solvente se empleó el método de Karl Fischer<sup>76</sup>; ya que es el más destacado para determinar la cantidad de agua y una variedad de compuestos orgánicos como haluros, hidrocarburos saturados y no saturados, alcoholes, ácidos, anhídridos de ácidos, ésteres, éteres, aminas, amidas, sulfuros, hidroperóxidos, nitro compuestos y dialquilperóxidos<sup>77</sup>, con el propósito de conocer la naturaleza del residuo líquido y establecer el mejor método de separación homogénea, puesto que podría implicar la formación de azeótropos, lo cual complicaría la separación. Esta prueba fue realizada por el Centro de Gestión Industrial Sena. Los resultados se pueden ver al detalle en el anexo H.

**Tabla 14.** Contenido de humedad del residuo solvente.

<b>Muestra</b>	<b>Masa colocada (g)</b>	<b>Humedad (mg)</b>
1	0,03219	2,56
2	0,03219	2,67
3	0,03060	2,64

Humedad 2,1680%

<sup>76</sup> OSPINA MACHADO, Julio Ernesto. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Contenido de humedad de equilibrio. Bogotá D.C.: Publisher, 2001. 38 p. ISBN 958-70-1182-1.

<sup>77</sup> RIVERA, Judith y PÉREZ, Melina. Empleo del sistema potenciométrico Karl Fisher en el desarrollo y la certificación de materiales de referencia (MR). En: Simposio de Metrología. Octubre, 2006, no. 1, 1-5p.

**Tabla 15.** Contenido de humedad de los componentes que integran el residuo solvente por el método de análisis Karl Fischer

<b>Componentes</b>	<b>Humedad Máx ( % m/m)</b>
Acetato de etilo	0,05
Etanol	0,50
N-propil acetato	0,10
1-propanol	0,20
1-metoxi 2-propanol	0,10

Humedad total 0,95%

Según el resultado de la humedad que se determinó por pesada respecto a la diferencia en el vaso de valoración por el método de Karl Fischer, se basó en la NTC 4659-Grasas y aceites vegetal y animales<sup>78</sup>, determinación del contenido de agua método de karl Fischer (ver tabla 14) y en la tabla 15 se muestra el contenido de humedad para cada componente que integra el residuo líquido, estos datos fueron tomados de la ficha técnica de cada componente, suministrada por la empresa. (Anexo A), además, hay que tener en cuenta que dada la naturaleza de las tintas, estas tienen una humedad despreciable, se evidencia una alta cantidad de humedad; ya que se encuentra este valor aproximadamente 1,218% por encima del valor máximo dadas las especificaciones de las fichas técnicas, debido a que las máquinas de impresión están ubicadas en un ambiente abierto, lo que implica una alta condensación alrededor y por el proceso de impresión tiende a incrementar la humedad del residuo líquido. Es importante mencionar que se tomaron tres muestras para observar la repetibilidad del ensayo y así garantizar la confiabilidad del mismo.

Cabe resaltar que, de acuerdo a las Normas Técnicas Colombianas utilizadas, se ajustaron los métodos de análisis a las características del producto debido a que no hay una Norma Técnica específica para este tipo de residuo.

## **2.4 BALANCE DE MATERIA**

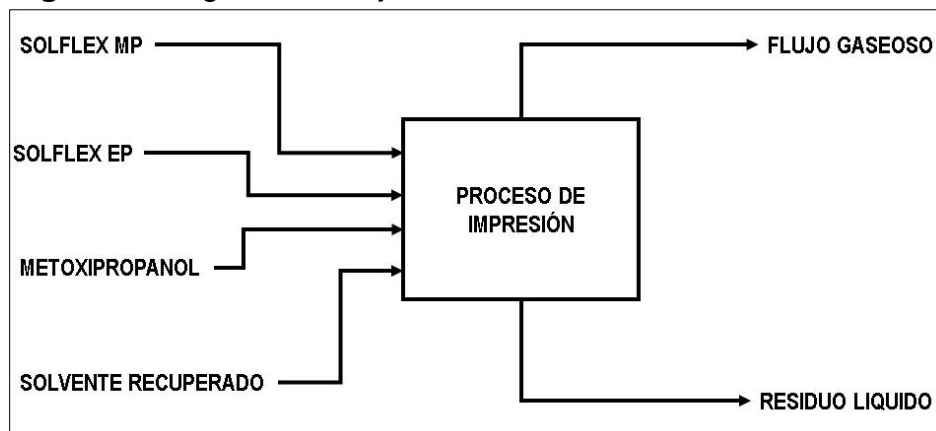
A partir de la identificación de materias primas y la información brindada por la empresa (Ver sección 2,2), se realizó el balance global del proceso de impresión cumpliendo con la ley de conservación de la materia, para determinar los flujos desconocidos y poder generar un diagnóstico de este proceso donde intervienen los solventes.

---

<sup>78</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Grasas y aceites vegetal y animales, determinación del contenido de agua método de karl Fischer. NTC 4659. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1999.



**Figura 6.** Diagrama de flujo de los solventes



En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo de los solventes que intervienen en la operación de impresión, donde la corriente ( $M_1$ ) corresponde al solflex MP, la corriente ( $M_2$ ) al solflex EP, la corriente ( $M_3$ ) metoxipropanol, la corriente ( $M_4$ ) solvente recuperado que se utiliza en el proceso de lavado, la corriente de salida ( $M_5$ ) al residuo gaseoso y la corriente ( $M_6$ ) al residuo líquido.

Teniendo en cuenta el periodo en que se realizó el muestreo del residuo y materias primas, se revisó el historial de consumo de solventes correspondiente al mes (diciembre 2016 y febrero 2017), por lo cual se puede afirmar que en estos meses hubo un consumo para el periodo diciembre 2016 de 178,81 kg solflex MP, 4407,40 kg solflex EP y 380 kg de metoxipropanol, mientras que en el mes de febrero 2017 fue de 360 kg solflex MP, 4546,10 kg solflex EP, 190 kg de metoxipropanol, mientras que durante el mes de diciembre 2016 y febrero 2017 se consumieron 833,88 kg de solvente recuperado y se generaron 1191,25 kg de residuo líquido.

A partir de los datos brindados por la empresa y con los resultados de la caracterización de los solventes y del residuo líquido (Ver sección 2.2.2.1), se realizó un balance de materia global y por componente de solventes, para poder determinar la cantidad y composición de la corriente 5, que corresponde al flujo gaseoso que se emite a la atmosfera. Inicialmente se establece el balance global para definir el flujo de la corriente 5.

Balance global

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = M_5 + M_6$$

$$M_6 = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 - M_5$$

$$M_6 = (269,40 + 4476,75 + 285 + 833,88 - 1191,25)kg = 4673,78 kg$$

Balance por componente.

$$M_2 * X_{2\text{ etanol}} + M_4 * X_{4\text{ etanol}} = M_5 * X_{5\text{ etanol}} + M_6 * X_{6\text{ etanol}}$$

$$X_{5\text{ etanol}} = \frac{M_2 * X_{2\text{ etanol}} + M_4 * X_{4\text{ etanol}} - M_6 * X_{6\text{ etanol}}}{M_5}$$

$$X_{5\text{ etanol}} = \frac{4476,75\text{ kg} * 0,251 + 833,88\text{ kg} * 0,1472 - 1191,25\text{ kg} * 0,1255}{4673,78\text{ kg}}$$

$$X_{5\text{ etanol}} = 0,2011$$

**Tabla 16.** Resultados balance de material.

Componente/Flujo	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Etanol	0,0000	0,2159	0,0000	0,1472	0,1255	0,2011
Propanol.	0,5624	0,5905	0,0023	0,5513	0,5816	0,5483
NPA	0,0000	0,1936	0,0000	0,1461	0,1195	0,1810
Metoxi propanol.	0,0000	0,0000	0,9977	0,0211	0,0828	0,0435
Acetato de etilo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0906	0,0021
Desconocido	0,4376	0,0000	0,0000	0,1343	0,0000	0,0240

Cabe aclarar, que no se realizó el balance teniendo en cuenta el flujo sólido que ingresa al proceso de impresión, es decir las tintas, debido a que no se contó con la información suficiente, debido a esto solo se realizó con los solventes

Para poder tener un indicador de consumo, es necesario conocer igualmente la cantidad de sustrato impreso durante dichos periodos, para el mes de diciembre se imprimieron 29500 kg y en el mes de febrero 21200 kg. De acuerdo a esto, se determinaron indicadores que relacionan la cantidad de materia prima (solventes) y residuo consumido por kilogramo de sustrato impreso.

**Tabla 17.** Indicadores de consumo por kg de sustrato impreso.

--	Periodo 1	Periodo 2
Solflex EP	0,1494	0,2144
Solflex MP	0,0061	0,0170
Metoxipropanol	0,0129	0,0090
Residuo líquido	0,0476	0,0562
Residuo gaseoso	0,1208	0,1842

Como se muestra en la tabla 17, para los dos periodos, donde el periodo 1 corresponde al mes de diciembre de 2016 y el periodo 2 a febrero de 2017, se

observa que el solflex EP es el de mayor consumo, mientras que el solvente de menor consumo es el metoxipropanol, en total de solventes se consumieron 4966,21 kg/mes y 5096,10 kg/mes para el primer y segundo periodo respectivamente. Con respecto a los residuos que resultan de la operación de impresión, se establece que se emitió a la atmosfera durante los periodos 1 y 2 respectivamente 3562,45 y 3904,85 kg equivalentes al 35,86% y 38,31%, mientras que del residuo liquido se generó tan solo un 14,13% y 11,68% respectivamente por cada kilogramo de sustrato impreso durante el periodo correspondiente.

Estos resultados, permiten tener una visión más clara sobre la situación actual del proceso, donde se evidencia un problema que puede considerarse grave, se trata del manejo de residuos, específicamente del residuo gaseoso el cual corresponde a 4673,78 kg promedio mensual, de los periodos en que se realizó el muestreo, siendo una cifra considerable al comparar con el residuo liquido igual a 1191,25 kg/mes. Teniendo en cuenta los problemas medioambientales ocasionados por las emisiones atmosféricas y lo que puede repercutir sobre la salud de los trabajadores al estar en contacto de manera tan recurrente con los compuestos orgánicos volátiles.

La importancia de este capítulo, radica en la necesidad de conocer la composición, el proceso de la compañía, la proporción de sólidos y humedad presentes en el residuo, porque a partir de estos datos se puede caracterizar el residuo y de acuerdo a esto poder seleccionar el método de separación que más aplica. Además, es indispensable señalar que, del diagnóstico realizado al proceso de impresión, resultan 1191,25 kg/mes de residuo líquido solvente de esta operación, 3733,65 kg/mes de residuo gaseoso que se emite hacia la atmósfera resultante del sistema de secado de las impresoras flexográficas y 217 de trapos sintéticos contaminados (Véase numeral 2.2.). Sin embargo, en este proyecto se trabajará solamente con el residuo líquido por facilidad, porque es lo que actualmente la compañía necesita más, como garantizar la calidad del solvente que se recircula a la operación de impresión indispensable tanto para el lavado de las unidades de esta operación como para la dilución de tintas y darle una mejor disposición para evitar el almacenamiento de éste residuo al exterior de la empresa.

### 3. ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SOLVENTES

En este capítulo se establecen diferentes métodos de separación que son evaluados mediante una matriz de selección, con el fin de encontrar el método de separación que mejor se ajuste al sistema. Como se observó en el capítulo anterior, el diagnóstico del residuo, se establece que el residuo se trata de una mezcla con sólidos solubles y que además está compuesta principalmente por sustancias volátiles. Finalmente se muestra la metodología y desarrollo experimental, el que brinda un acercamiento al comportamiento del residuo al ser sometido a un método de recuperación.

#### 3.1 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN

A continuación, se presentan las técnicas de separación existentes, profundizando en las que más se acomodan a las características y condiciones del residuo.

**3.1.1 Métodos de separación mecánica.** Los métodos mecánicos se fundamentan en la separación de mezclas que presentan una alimentación que contiene dos fases heterogéneas (ver glosario), como sólidos suspendidos en líquido, partículas sólidas en gas o dos fluidos inmiscibles.<sup>79</sup> Estas técnicas aprovechan principalmente la diferencia de tamaño de partícula y densidad de las sustancias involucradas.

**3.1.1.1 Filtración.** La filtración está basada en la diferencia de tamaño de partícula, empleado para eliminar partículas sólidas contenidas en un líquido o en un gas, se fundamenta en que la mezcla pasa por medio de una barrera porosa, como una membrana, y los sólidos quedan retenidos mientras que la mayor parte del fluido atraviesa esta barrera.<sup>80</sup> Existe una gran diversidad de equipos, como filtros de prensa y de hojas, rotatorios, continua al vacío, continua, a presión constante, con membrana, con cartucho, con bomba centrífuga y clarificadora.<sup>81</sup>

---

<sup>79</sup> MURPHY, R, M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. México D.F.: McGraw-Hill. 2007.p 370-371.

<sup>80</sup> & <sup>82</sup>GONZÁLEZ BRAMBILA, Margarita M. Introducción a la ingeniería de procesos. Selección del sistema de separación. México D.F.: Limusa,2013. p.186 245. ISBN 978-607-05-0496-9.

<sup>81</sup> OTHMER, Kirk. Enciclopedia de tecnología química. Mexico D.F. Editorial Limusa, S.A de C.V Grupo Noriega Editores,2001. p. 525 ISBN 968-18-5576-0.

**3.1.1.2 Sedimentación.** La sedimentación consiste en que las partículas sólidas que están suspendidas se separan parcialmente del líquido mediante la gravedad. Esta última puede mejorar cuando se agregan agentes floculantes que promueven la agregación del sólido en partículas de mayor tamaño, lo que produce mayor facilidad para que se dé la separación.<sup>82</sup>

El uso de la sedimentación en la industria se divide en las siguientes categorías separación solido-líquido, solido-solido, determinación del tamaño de partícula, operaciones como transferencia de masa, lavado entre otras<sup>83</sup>.

En la actualidad este método cuenta con múltiples equipos como tanque de sedimentación de flujo vertical, intermitente, hidrociclones, clarificador simple de precipitación por gravedad, clarificador Spitzkasten y espesador de sedimentación<sup>84</sup>

**3.1.1.3 Flotación.** El proceso de flotación se basa tanto en el aprovechamiento de la fuerza de gravedad como de la diferencia de las propiedades superficiales de las partículas. Se realiza haciendo pasar una corriente de burbujas de gas en el seno de un líquido, mientras que las partículas sólidas se adhieren al gas, ascendiendo junto con las burbujas. Se utiliza para mezclas sólido -sólido, cuando los sólidos presentan distinto grado de adherencia a la superficie de la burbuja de gas. Además se pueden agregar sustancias químicas al proceso como modificadores de pH, agentes hidrofóbicos, los cuales hacen que el sólido disminuya la tendencia a incorporarse en las burbujas del gas<sup>85</sup>.

**3.1.1.4 Centrifugación.** La centrifugación se utiliza cuando la separación por medio de la fuerza de la gravedad es muy lenta, debido a que la diferencia entre las densidades de las fases o el tamaño de las partículas es muy pequeña. En esta operación se genera una fuerza centrífuga por medio de la fuerza mecánica y esta hace que la fase más densa o los sólidos migren hacia afuera<sup>86</sup>.

Este método cuenta con una gran variedad de equipos como separador ciclónico, centrífuga con camisa maciza, hidrociclones, bombas centrifugas, compresores centrífugos, centrífuga de botella, de descarga y conducción continua, de operación continua de filtro cilíndrico y ultracentrífugas preparativas o analíticas<sup>87</sup>.

A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas de los métodos mecánicos en el cuadro 2.

---

<sup>83</sup> &<sup>84</sup>&<sup>86</sup>OTHMER, Kirk. Enciclopedia de tecnología química. Sedimentación. México D.F.: Limusa, S.A de C.V,2001. p. 4-7, 1279-1282. ISBN 968-18-5576-0.

<sup>85</sup>GONZÁLEZ BRAMBILA, Margarita M. Introducción a la ingeniería de procesos. Selección del sistema de separación. México D.F.: Limusa,2013. p. 197. ISBN 978-607-05-0496-9.

<sup>87</sup> DIRSCHERL, Jurgen. Chemistry vacuum pumps and pumping units with ATEX conformity. En: Laboratory equipment. Octubre, 2004.p.1-3.

**Cuadro 2.** Ventajas y desventajas métodos de separación mecánica

<b>Método.</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Filtración.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separación total de sólidos suspendidos en el seno de un fluido.</li> <li>• Los poros del medio filtrante pueden ser lo suficientemente pequeños para retener los sólidos suspendidos o contenidos en la mezcla<sup>88</sup>.</li> <li>• Bajo costo de inversión y mantenimiento.</li> <li>• Aplica para volúmenes de filtración elevados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede generar migración del material filtrante<sup>89</sup>.</li> <li>• La filtración por membrana resulta más costosa.</li> <li>• Requieren mucho tiempo en el desarmado, lavado y armado.</li> </ul>
Sedimentación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una operación que no genera alto consumo de energía.</li> <li>• Es una técnica eficiente, por lo cual presenta alta precipitación de los sólidos.</li> <li>• Es uno de los métodos más simples para eliminar sólidos gruesos o densos en una suspensión.</li> <li>• Los sedimentadores se adaptan a una amplia variedad de diseños<sup>90</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiencia en la retención de partículas pequeñas.</li> <li>• La mayoría de procesos que utilizan este método requieren de unidades continuas<sup>91</sup>.</li> <li>• Para los equipos se requiere un diseño muy riguroso del perfil hidráulico<sup>92</sup>.</li> </ul>

<sup>88</sup> WINNACKER, karl y WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Tomo I. Barcelona: Gustavo Gili, 1949, p.86-98.

<sup>89</sup> Coalescencia Filtros coalescedores. [En línea]. [Citado 14 de febrero 2017]. Disponible por internet: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_06.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_06.pdf).

<sup>90</sup> GUIHUA, Zhu, et al. Flow simulation and analysis in a vertical flow sedimentation tank. En: Procedia,2012, p. 197-202.

<sup>91</sup> ARAGONÉS BOUSO, Juan Luis. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Informe técnico. [En línea]. [Citado en marzo 2017]. Disponible por internet: [http://www.concretonline.com/pdf/04canteras/art\\_tec/Eral5.pdf](http://www.concretonline.com/pdf/04canteras/art_tec/Eral5.pdf)

<sup>92</sup> WAQAS, Aleem y NURHAYATI, Mellon. Experimental study on the effect of parameters on sedimentation and coalescing profiles in liquid-liquid batch settler. En: Procedia Engineering. 2016, nro 148, p.887-895.

**Cuadro 2.** (Continuación)

<b>Método.</b>	<b>• Ventajas</b>	<b>• Desventajas</b>
Flotación.	<ul style="list-style-type: none"><li>• A diferencia de la sedimentación este método permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta<sup>93</sup>.</li><li>• Proceso efectivo para tratar aguas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Presenta sensibilidad a variaciones en la temperatura, a mayor concentración de sólidos en suspensión.</li><li>• Presenta altos costos de diseño y operación.</li></ul>
Centrifugación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrífuga la cual comprime la mezcla.</li><li>• Permite la separación de varios o todos los componentes de la mezcla y realizar medidas analíticas.</li><li>• Puede utilizarse para la separación rápida de sustancias que a condiciones normales se separarían lento bajo la influencia de la gravedad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere de un dimensionamiento muy grande.</li><li>• La implementación de su tecnología es costosa.</li><li>• La fuerza centrífuga genera gran desgaste en las partes internas<sup>94</sup>.</li><li>• Eventuales oxidaciones en los equipos.</li></ul>

<sup>93</sup> OTHMER. Op. Cit, p 78

<sup>94</sup> LIU, Zheji y HILL, D. Lee. Centrifugal compressor noise reduction by using helmholtz resonator arrays. En: Dresser-Rand. 2005. p. 1-18.

A pesar de los métodos mecánicos tratados, hay dos que no aplican y no se usarán para la fase heterogénea, el primero es la flotación debido a que es un proceso efectivo para tratar solamente aguas especialmente las aguas industriales. El segundo se refiere a la centrifugación por ser un método eficaz para la separación de sueros o plasma, concentración de células, quilomicrones de suero o para fraccionar distintas lipoproteínas, es decir, sustancias biológicas, lo cual lo hace un proceso deficiente para tratar los componentes del residuo solvente<sup>95</sup>.

**3.1.2 Métodos de separación basados en el equilibrio.** Se caracterizan porque el alimento es una mezcla multicomponente, pero esta se encuentra en una sola fase, sin embargo durante el proceso se formará una segunda fase, por lo cual las composiciones de esta dos fases serán distintas, para lograr esto es necesario contar con la ayuda de un agente separador, el cual puede ser energía, un material o sustancia agregada.<sup>96</sup>

**3.1.2.1 Destilación.** La destilación es una operación que se basa en el equilibrio líquido vapor, teniendo en cuenta la presión de vapor de los fluidos, se alimenta la mezcla en una columna de múltiples etapas que aprovecha las diferencias en la volatilidad relativa para separar los componentes<sup>97</sup>.

Si bien es cierto que la destilación es el método más utilizado para la separación de disolventes, hay que tener en cuenta ciertos parámetros como indica Smallwood, que tienen una gran influencia en el diseño del proceso.<sup>98</sup> Una de ellas es la existencia de azeótropos en el sistema, éstos son muy frecuentes en los sistemas donde se utilizan solventes. Sin embargo, la existencia de azeótropos, no sería un problema por lo que se desea obtener es una mezcla para la operación de impresión y no componentes puros por separar.

Los parámetros de diseño, son los que hacen que la columna logre la separación requerida, así como el número de etapas teóricas y si este número de etapas es el adecuado para el reflujo total. Inicialmente se requiere conocer la presión de operación, relación de reflujo, la condición térmica de la alimentación, la velocidad de flujo, composiciones de la mezcla de alimentación y el grado de separación al que se desea llegar.

En el cuadro 3, se presentan los principales tipos de destilación para separar solventes junto con su modo de operación.

---

<sup>95</sup>SCHREIBER, Marc; WITS, Wessel y TE RIELE, Gert Jan. Numerical and experimental investigation of a counter-current two phase thermosyphon with cascading pools. En: Applied thermal engineering. Enero, 2016, N°.99, p. 133-146

<sup>96</sup> MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. MéxicoD.F.: McGraw Hill. 2007.p 374.

<sup>97</sup> WINNACKER, Karl & WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Tomo I. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1949, p.109-117.

<sup>98</sup>SMALLWOOD, I, N, The Solvent Recovery Handbook. Segunda edición. USA and Canada: Blackbell Science Ltda, 2002. p. 77-79. ISBN 0-8493-1602-2



### Cuadro 3. Métodos de fraccionamiento.

Tipo de destilación	Continuo	Batch
Atmosférica.	Aplica	Aplica
Vacío.	Aplica	Aplica
Por arrastre de vapor	Aplica	Aplica
Azeotrópica	Aplica	Aplica
Extractiva.	Aplica	No Aplica
Presión	Aplica	Aplica

**Fuente:** SMALLWOOD, Ian M. Solvent Recovery Handbook. Second edition. Blackwell Science. 2002. p. 54

**3.1.2.2 Cristalización.** “La cristalización es una operación, la cual consiste en enfriar la mezcla hasta que se rebasa el límite de solubilidad, es un método basado en la solubilidad a temperaturas iguales o cercanas al punto de fusión”<sup>99</sup>.

El problema que se presenta para llevar a cabo una cristalización, es la selección del disolvente, porque con este, la sustancia a purificar debe tener un comportamiento adecuado con respecto a la solubilidad. “Idealmente la sustancia debe ser insoluble a temperatura ambiente y soluble a temperaturas próximas al punto de ebullición”.<sup>100</sup>

La volatilidad del disolvente juega un papel muy importante porque mientras un disolvente volátil permite fácilmente la separación de los cristales por evaporación, la separación se dificulta para aquellas mezclas que contengan compuestos en los que el punto de ebullición sea elevado. En cuanto a la selección del disolvente son más adecuados aquellos que tengan un punto de ebullición menor al punto de fusión del componente a cristalizar<sup>101</sup>.

**3.1.2.3 Evaporación.** La evaporación al igual que la destilación se basa en el principio físico de la presión de vapor. Consiste en que la alimentación es una mezcla líquida que se calienta mediante un vapor generado a partir de la misma por ebullición, hasta que una parte del material se vaporiza.<sup>102</sup>

La velocidad de evaporación de un solvente depende de la diferencia en la presión de vapor. Su objetivo es concentrar una solución consistente en un soluto no volátil

<sup>99</sup> WINNACKER, Karl y WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Cristalización. Tomo I. Barcelona: Editorial Gustavo Gili 1949, p.121-125.

<sup>100</sup> MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. México D.F.: McGraw-Hill. 2007. p. 427

<sup>101</sup> OTHMER, Kirk. Enciclopedia de tecnología química. Cristalización. México D.F.: Limusa, S.A., 2001. p. 523-526. ISBN 968-18-5576-0.

<sup>102</sup> MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. McGraw Hill. México D.F. 2007. p. 389.

y un solvente volátil<sup>103</sup>. Este proceso cuenta con equipos como evaporadores de múltiple efecto, al vacío, circulación forzada, circulación natural, de placas, tipo película, con un paso y de circulación, de tubos largos con flujo ascendente, de película descendente y de película agitada<sup>104</sup>

**3.1.2.4 Adsorción.** Es la operación en que uno o varios componentes de una mezcla líquida se separan mediante un sólido adsorbente ajeno de la misma<sup>105</sup>. Para el diseño de equipos, esta operación requiere parámetros como temperatura, presión, flujo y concentración de la corriente de entrada y nivel de remoción del componente que se transfiere de la fase pesada o liviana<sup>106</sup>.

**3.1.2.5 Extracción.** La extracción es una operación que se utiliza para separar una sustancia de una disolución, mediante el uso de un disolvente, se utiliza para recuperar una sustancia de interés de la disolución original o purificar el disolvente original eliminando el componente no deseado.<sup>107</sup> Este disolvente tiene que ser inmiscible en la mezcla y de distinta naturaleza a la misma<sup>108</sup>.

La extracción es un proceso que depende de las características de la sustancia a extraer, porque se debe buscar o asegurar que el soluto tenga una mayor solubilidad en el disolvente que se utiliza para la extracción del disolvente original alimentado. Los dos disolventes deben ser inmiscibles, para que pueda ocurrir la extracción.<sup>109</sup> En algunos casos según Sinnott se puede considerar la extracción como una alternativa a la destilación.<sup>110</sup>

- Cuando los componentes en la alimentación tienen puntos de ebullición cercanos, resulta más económica la extracción con un disolvente si la volatilidad relativa está por debajo de 1,2.

---

<sup>103</sup>MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C. y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. Evaporación. Séptima edición. México D.F.: McGraw- Hill, 2007. p. 511-513 ISBN 970-10-6174-8.

<sup>104</sup>Universidad de Sevilla. Tipos de evaporadores. [Citado en febrero de 2017]. [En línea]. Disponible por internet en: [http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina\\_06.htm](http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_06.htm)

<sup>105</sup>MARTINEZ DE LA CUESTA, Pedro y RUS MARTINEZ, Eloisa. Operaciones de separación en ingeniería química. Métodos de cálculo. España: Pearson Prentice Hall, 2004. p. 14. ISBN 84-205-4250-4.

<sup>106</sup>ALZATE FONTALVO, Javier y GÓMEZ GARCÍA, Miguel Ángel. Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en Matlab. Operaciones de separación con múltiples etapas. Bogotá D.C: Unibiblos, 2008. p. 61-62. ISBN:978-958-719-032-8.

<sup>107</sup>MURPHY, R. Introducción a los procesos químicos. Principios, análisis y síntesis. México: McGraw-Hill, 2007. p.443

<sup>108</sup>MARTINEZ DE LA CUESTA, Pedro y RUS MARTINEZ, Eloisa. Operaciones de separación en ingeniería química. Métodos de cálculo. España: Pearson Prentice Hall, 2004. p. 14. ISBN 84-205-4250-4.

<sup>109</sup>&<sup>110</sup>SINNOTT, R y TOWLER, G, Chemical Engineering Design, Quinta edición. Kidlington, Oxford: Elsevier Limited of the Boulevard, 2012. p. 619, 775.

- Si los compuestos del alimento forman un azeótropo.
- Cuando el soluto es sensible al calor, y se puede extraer con un disolvente de ebullición más bajo, puede reducir el calor durante la separación.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de los métodos anteriormente expuestos.

**Cuadro 4.** Ventajas y desventajas métodos de separación por equilibrio.

<b>Método.</b>	<b>Ventajas.</b>	<b>Desventajas.</b>
Destilación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad para procesar grandes flujos, ya que es un proceso continuo que se lleva a cabo en una columna de platos y cuyas dimensiones se ajustan a las capacidades y purezas requeridas.<sup>111</sup></li> <li>• Capacidad para obtener productos de muy alta pureza, dependiendo del número de platos.</li> <li>• Existen varios métodos de destilación, que se utilizan según las condiciones dadas y la naturaleza de la mezcla, por ejemplo, la destilación al vacío, se utiliza cuándo la mezcla tiene compuestos con puntos de ebullición elevados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cantidad de energía que se suministra para lograr la separación es mucho mayor que la que se requiere para separar la mezcla en sus componentes puros.<sup>112</sup></li> <li>• La destilación no es recomendable para algunas mezclas de componentes que tengan puntos de ebullición muy cercanos<sup>113</sup>.</li> <li>• En el diseño se presenta una baja eficiencia, porque requieren de un mayor número de platos respecto al número teórico de etapas de equilibrio.<sup>114</sup></li> </ul>

<sup>111</sup> MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. México D.F.: McGrawHil, 2007- p.374. 441

<sup>112</sup> WANKAT, Phillip, C, Ingeniería de Procesos de Separación. Segunda edición. México D.F.: Pearson educación, 2008. p. 65-67

<sup>113</sup> ALZATE FONTALVO, Javier y GÓMEZ GARCÍA, Miguel Ángel. Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en Matlab. Modelamiento y simulación de columnas de destilación continuas en estado estable según los modelos de no equilibrio. Manizalez: Universidad Nacional de Colombia: Unibiblos, 2008, p.105-106. ISBN:978-958-719.

<sup>114</sup> CORTEZ, Jazmín. et al. Optimal desing of distillation systems with less tan N-1 columns for a class of four component mixtures. En: Elsevier. 2012, 90. p 1425-1447.

**Cuadro 4.** (Continuación)

<b>Método.</b>	<b>• Ventajas.</b>	<b>• Desventajas.</b>
Cristalización.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un método eficaz para separar o purificar compuestos orgánicos.</li> <li>• Es una alternativa a la destilación para la separación de azeótropos y mezclas con temperatura de ebullición cercanas.</li> <li>• En general esta operación se efectúa a una temperatura más cercana a la temperatura ambiente, a diferencia de la destilación, puede trabajarse a bajas temperaturas.<sup>115</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La operación involucra manejo de sólidos, lo cual genera inconvenientes técnicos y económicos con el manejo de estos.</li> <li>• En general, no se puede purificar más de un componente ni recuperar todo el soluto en una única etapa. Es necesario un equipo adicional para retirar el soluto restante de la disolución.</li> </ul>
Evaporación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una operación aplicable a múltiples equipos.</li> <li>• Es un método que reduce el volumen del fluido para economizar costos operacionales.</li> <li>• Tiene buena eficiencia de transferencia de calor.</li> <li>• Presenta buenas características de separación vapor - líquido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generalmente cuando el consumo de vapor disminuye, el costo se eleva.</li> <li>• Requieren de una barrera para evitar contaminantes o material colado dentro del sistema, lo cual repercute en el costo total del equipo.</li> </ul>

<sup>115</sup>MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. Mexico D.F.: McGrawHil, 2007. p. 379

**Cuadro 4.** (Continuación)

<b>Método.</b>	<b>• Ventajas.</b>	<b>• Desventajas.</b>
Adsorción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un método de separación complementario a los procesos con etapas de equilibrio.</li> <li>• Permite la purificación de los efluentes de proceso para el control de la contaminación.<sup>116</sup></li> <li>• Es el método más económico, en relación con propiedades como la selectividad y la inestabilidad química del adsorbato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso de regeneración del sólido utilizado genera que se eleven los costos.</li> <li>• Generalmente si se requiere recuperar un disolvente se necesita de una operación posterior de desorción o agotamiento.<sup>117</sup></li> </ul>
Extracción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opera a amplias condiciones de flujo. Y elevados niveles de eficiencia.</li> <li>• Equipo con construcción sencilla.</li> <li>• Opera con pequeñas diferencias de densidad entre las fases.<sup>118</sup></li> <li>• Se usa cuando no aplican métodos como la destilación, la cristalización..<sup>119</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevados costos energéticos y de mantenimiento.</li> <li>• Es un proceso que requiere mayor selectividad a diferencia de la destilación.</li> <li>• La recuperación del disolvente es un factor dominante como resultado del gran consumo de energía<sup>120</sup>.</li> </ul>

<sup>116</sup>SEADER, J.D; HENLEY, Ernest J. & ROPER, D. Separation process principles. Tercera edición. United States: John Wiley & Sons, 2011. p. 621.

<sup>117</sup>WINNACKER, Karl & WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Tomo I. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1949, p. 123.

TOMÁS DO COUTO, Ricardo Miguel. Development of integrated separation processes with green solvents. Diciembre, 2012.47 p.

<sup>118</sup>MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. México D.F.: McGraw-Hill. 2007, p. 446.

<sup>119</sup>WINNACKER, Karl & WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Tomo I. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1949, p. 117

<sup>120</sup>ALZATE FONTALVO, Javier y GÓMEZ GARCÍA, Miguel Ángel. Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en matlab. Operaciones de separación con múltiples etapas. Bogotá D.C: Unibiblos,2008. p. 63-64. ISBN:978-958-719-032-8.

Los métodos anteriormente mencionados se utilizan ampliamente en la industria, sin embargo, existen otros métodos que no se aplican al tipo de mezcla, como es el caso del método de absorción que, a pesar de presentar buenos índices de remoción de sustancias o contaminantes, se aplica para mezclas de alimentación en fase gaseosa.

### 3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

El principio general de la selección del método, es la separación del solvente de los constituyentes indeseados, es decir separar la fracción volátil de la no volátil, a partir del análisis de gravimetría, se determinó que la mezcla contiene sólidos solubles, por lo cual los métodos de separación mecánicos no aplican. Teniendo en cuenta esto y que en la actualidad existen una variedad de procesos que pueden ser aplicables, la elección de las alternativas dentro de este grupo de procesos es efectuada principalmente mediante consideraciones de orden técnico y económico. Porcentaje criterios de selección. Según Sinnott, Towler <sup>121</sup> para seleccionar el método de separación hay que establecer criterios para evaluar cada alternativa.

Para ello, se utilizó la metodología de Kepner Tregoe<sup>122</sup> porque es un medio sencillo, lógico y productivo para conseguir buenos resultados, éste consiste en asignar puntuaciones ponderadas a cada criterio, es decir, el puntaje que se le da a cada alternativa multiplicada por el peso del criterio, al cual se le asigna un valor de 1 a 10 de acuerdo al grado de importancia (véase tabla 18). Para una mayor comprensión de los resultados referentes a los criterios ver gráfica 7, estos porcentajes se establecieron con el total de cada criterio de selección dividido en el puntaje total a partir de las ponderaciones mencionadas junto con su respectiva justificación respecto al peso dado, todo esto se resume en una matriz (Véase Anexo I).

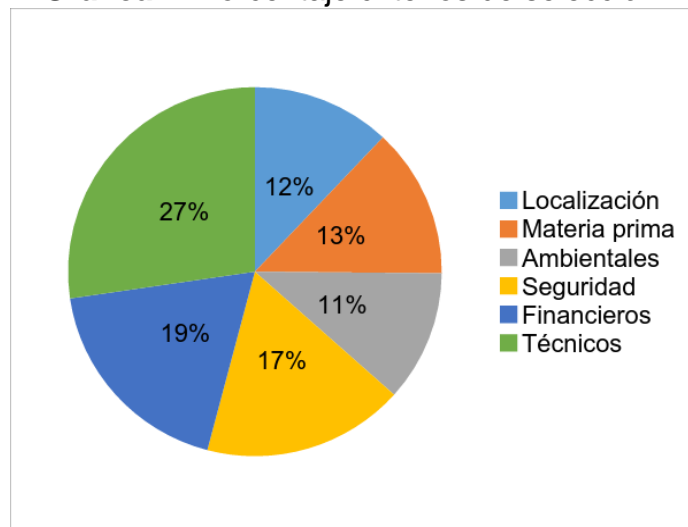
**Tabla 18.** Rangos de calificación criterios.

<b>Evaluación.</b>	<b>Calificación.</b>
No importante	1-3
Poco importante	4-6
Importante	6-8
Muy importante	8-10

<sup>121</sup> SINNOTT, R and TOWLER, G, Chemical Engineering Desing, Quinta edición. Langford Lane, Kidlington, Oxford: Elsevier Ltd. 2012, p. 2-8.

<sup>122</sup> KEPNER, Charles H. y TREGOE, Benjamin B. El nuevo directivo racional. Análisis de problemas y toma de decisiones. México D.F: McGraw Hill, 1986, p 94-110.

**Gráfica 7. Porcentaje criterios de selección.**



La ponderación de las alternativas se realizó teniendo en cuenta los rangos descritos en la tabla 19.

**Tabla 19. Rangos de calificación alternativas**

Evaluación.	Calificación.
Desfavorable	1-3
Poco favorable	4-6
Favorable	6-8
Muy favorable	8-10

A partir de una revisión bibliográfica se estableció una clasificación que consta de seis grupos que se muestran a continuación.<sup>123</sup>

**3.2.1 Técnicos.** Los criterios técnicos están relacionados con la efectividad del proceso: las composiciones esperadas del producto, la sencillez del proceso de separación (una o dos unidades de proceso), flexibilidad del proceso y facilidad de la operación<sup>124</sup>.

- Flexibilidad del proceso: Se refiere a que el proceso puede fácilmente ser sometido a cambios en el flujo de alimentación, debido a alteraciones en la demanda del producto.

<sup>123</sup> SINNOTT, R and TOWLER, G, Chemical Engineering Desing, Quinta edición. Langford Lane, Kidlington, Oxford : Elsevier Ltd.. 2012, p. 327.

<sup>124</sup> TUSSO PINZÓN, Ricardo Andrés y MARÍÑO, Juan Carlos. Estudio para la recuperación de solventes de lavado de rodillos y mantillas en la planta de manufactura de Legis S.A. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2008, p.37



- Rendimientos: Se refiere a que el proceso cumpla con requerimientos deseados o esperados.
- Requerimientos energéticos: El proceso requiere mucha o poca energía que influencia en los costos.
- Agente de separación externo. Se presenta cuando determinado proceso requiere de alguna sustancia adicional para lograr la separación; ya que va a requerir de un pretratamiento o disposición del agente.
- Aplicabilidad con respecto a la mezcla de solventes. Se refiere a que el método se adapta al tipo de mezcla, dada la naturaleza y condición de los componentes de esta.
- Complejidad de la operación. Se refiere a que la operación se considera con un alto o bajo grado de complejidad. En caso de que sea alto puede presentar problemas en la operación y control del proceso como que tenga capacidad insuficiente para soportar cambios bruscos de presión o temperatura. Mientras que si es baja la complejidad se podrán manejar condiciones ambientales o moderadas.

**3.2.2 Financieros.** Los criterios financieros influyen en gran medida a la hora de elegir la alternativa, porque de esto depende la inversión que se deba hacer para determinada operación. A continuación se puntualizará en cada uno de los criterios<sup>125</sup>:

- Capital fijo: Lo integran el diseño, construcción, instalación, costo de equipos, tubería, aislamiento y adecuación de la infraestructura, en conjunto se refieren a las instalaciones, desde el punto de vista del tamaño del equipo y la disponibilidad del espacio. Lo cual depende en gran medida a la complejidad geométrica, materiales de construcción y las condiciones de operación que ha de soportar el equipo
- Capital de trabajo. Está conformado por materia, producto y subproducto, es decir, los recursos que están disponibles, que el producto resultante del proceso sea el adecuado y al uso que se le puede dar al subproducto, todo esto se resume en costos o ganancias.
- Costos variables de producción. Se refiere a los costos que implica la materia prima, el consumo de servicios como combustible, vapor, agua, electricidad, aire o la utilización en el proceso de disolventes, ácidos, catalizadores, adsorbentes/absorbentes, así como el embalaje y transporte, indispensables para el buen

---

<sup>125</sup> SINNOTT, Ray y TOWLER, Gavin. Diseño en ingeniería química, Quinta edición. España: Reverté S.A, 2012. p. 292. ISBN 978-84-291-7199-0.

funcionamiento de las unidades de proceso, para la protección del producto<sup>126</sup>.

- **Costos fijos de producción.** Son los costos relacionados con la operabilidad de un proceso que incluyen gastos salariales, trabajo de operación, impuestos, supervisión y mantenimiento por parte del personal. De acuerdo a la complejidad del proceso estos costos se verán influenciados, como el caso de la extracción líquida, porque al ser un proceso mayor dificultad va a requerir de personal especializado para su manejo y control.

**3.2.3 Seguridad.** Dada la importancia de los riesgos en un proceso por los fallas y efectos secundarios que se pueden presentar durante el desarrollo del proceso, debe tenerse en cuenta la probabilidad de un accidente, que se pueden generar por el mal manejo de sustancias peligrosas o del equipo y las condiciones del lugar donde se va a llevar a cabo el proceso. Es por ello, que para esta sección se tuvieron en cuenta los siguientes criterios<sup>127</sup>

- **Uso de sustancias.** Se refiere al grado en que las materias primas o sustancias externas inflamables o tóxicas pueden intervenir en un proceso, por lo cual se debe tener en cuenta los efectos adversos potenciales para la salud, las medidas de primeros auxilios, el manejo y el almacenamiento.
- **Incompatibilidad de materiales.** Se presenta cuando los materiales pueden alterar los componentes de las sustancias que se están empleando en el proceso, debido a esto hay agentes externos que por sus propiedades deben mantenerse a condiciones o con materiales especiales.
- **Exposición de los operarios.** Este apartado corresponde a mantener las condiciones más seguras y lo más automático posible para disminuir la exposición del personal.

**3.2.4 Ambientales.** En la actualidad el manejo de residuos líquidos, sólidos y emisiones de COV' S, es importante, para que la alternativa planteada sea técnicamente viable con la ubicación de la empresa, es por ello que se le debe realizar un adecuado control a las unidades de proceso empleadas para la recuperación y para disminuir el impacto negativo en el medio ambiente. Es así como en este apartado se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- **Emisiones atmosféricas.** Este apartado está relacionado con las emisiones contaminantes que puede emitir cierta operación debido a las sustancias que se utilizan para la separación de componentes como disolvente o agente

---

<sup>126</sup> GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Análisis económico de procesos. España: Reverté S.A., 2003. p. 22. ISBN 84-291-7277-7.

<sup>127</sup> SINNOTT, Ray y TOWLER, Gavin. Diseño en ingeniería química. Quinta edición. España: Reverté S.A., 2012. p. 474-495. ISBN 978-84-291-7199-0.

adsorbente.

- Generación de residuos. Se refiere a que un proceso puede producir mayor cantidad de residuos líquidos o sólidos a comparación de otro.
- Impacto audiovisual. Está relacionado con la complejidad, dado el montaje de una unidad de proceso; ya que dependiendo de esto puede causar un impacto positivo o negativo tanto en lo visual como en lo auditivo.

**3.2.5 Materia prima.** La materia prima es esencial para el desarrollo del proceso, porque es la base del mismo, por ello es importante asegurar la disponibilidad, y si ésta requiere de algún tipo de pretratamiento y condiciones especiales de almacenamiento<sup>128</sup>.

**3.2.6 Localización.** La localización de la planta juega un papel muy importante, debido a que con esto se determina la disponibilidad de área, materia prima, servicios y transporte para asegurar que las condiciones del lugar sean las más adecuadas para el proceso y que cumpla con la normatividad legal del sitio. Se tuvieron en cuenta los siguientes criterios<sup>129</sup>:

- Disponibilidad de espacio. Se relaciona con el área que necesita una operación, es decir, un dimensionamiento pequeño o muy grande para el proceso.
- Servicios auxiliares. Corresponde a servicios como electricidad, vapor, agua de refrigeración o de otro tipo, aire comprimido y gas inerte que demanda la operación.
- Facilidad de transporte. Corresponde a la viabilidad en cuanto al transporte de las materias primas o agentes externos.

### 3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SEPARACIÓN

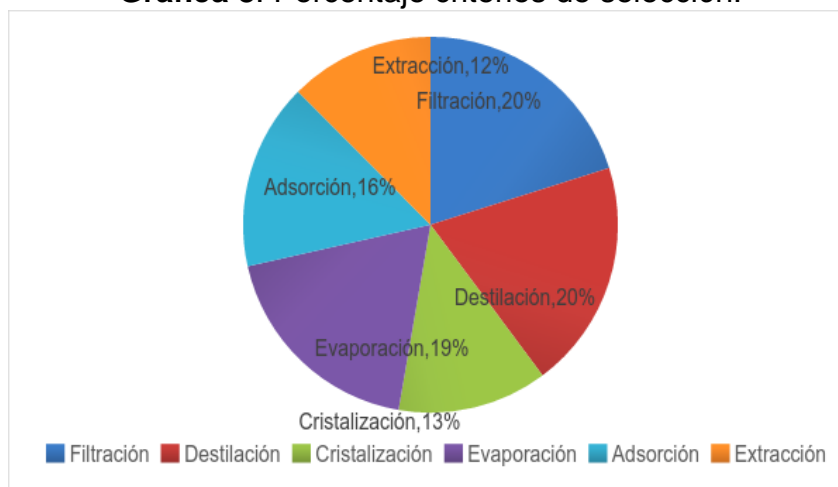
La matriz de selección (ver anexo I), es una herramienta que, mediante los criterios establecidos, asigna prioridades, evalúa y disminuye el número de opciones. Partiendo de esto, se establecen y evalúan los métodos de separación que aplican para este tipo de mezcla, siendo la destilación la operación seleccionada, por ser el más favorable de acuerdo a los parámetros anteriormente descritos con un porcentaje de 20% según la gráfica 8.

---

<sup>128</sup> MONCADA, Luis. Diseño de plantas químicas. p 41

<sup>129</sup> SINNOTT, Ray y TOWLER, Gavin. Diseño en ingeniería química, Quinta edición. España: Reverté S.A, 2012. p 1068 – 1069. ISBN 978-84-291-7199-0.

**Gráfica 8.** Porcentaje criterios de selección.



Como se aprecia en la gráfica 8, tanto la destilación como la filtración tienen el mismo resultado, sin embargo, se seleccionó la destilación por encima de la filtración, porque esta última no presenta una buena separación o no se obtendrá el producto deseado, de acuerdo al diagnóstico realizado en el capítulo 2; ya que esta operación se aplicaría para separar sólidos sedimentables, de acuerdo a las pruebas realizadas, el residuo solvente se trata de una mezcla sobresaturada con sólidos solubles, lo que quiere decir, que se requiere de una separación que sea capaz de separar la fracción volátil de la no volátil.

De acuerdo a que se seleccionó la destilación, a continuación, se presenta un cuadro comparativo donde se tienen los principales tipos de destilación y sus características más importantes.

**Cuadro 5.** Ventajas y desventajas de los tipos de destilación

<b>Destilación.</b>	<b>Ventajas.</b>	<b>Desventajas</b>
Vacío. <sup>130</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede usar para compuestos que son miscibles con agua o en procesos donde el agua genera azeótropos.</li> <li>• Se usa para evitar dañar las sustancias que se están procesando, porque pueden tender a descomponerse, polimerizarse a altas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las columnas al vacío presentan costos de capital y de operación elevados porque el proceso implica condiciones rigurosas de vacío.</li> <li>• Se requiere de materiales de construcción especiales capaces de soportar la presión generada.</li> <li>• Se necesitan precauciones de seguridad e inspecciones adicionales si se manejan fluidos inflamables.</li> </ul>
Por arrastre de vapor. <sup>131</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El vapor se puede ver como un gas portador inerte que permite que la mezcla de disolventes hierva a una temperatura por debajo de su punto de ebullición atmosférico.</li> <li>• Permite la eliminación de residuos de disolventes.</li> <li>• Es una mejor operación que la pervaporación por costos.</li> <li>• Se usa para sustancias sensibles al calor y compuestos con puntos de ebullición elevados.</li> <li>• Es una alternativa a la destilación al vacío.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los disolventes de bajo punto de ebullición forman azeótropos de agua que son difíciles de secar y puede originarse una cantidad apreciable de agua contaminada.</li> <li>• No mejora la volatilidad relativa para compuestos miscibles en agua.</li> <li>• Tiene inconveniente con la incineración de residuos.</li> </ul>

<sup>130</sup> SINNOTT, Ray y TOWLER Gavin. Diseño en ingeniería química. Quinta edición. Barcelona: Reverté, 2012. p. 717-720.

<sup>131</sup> SMALLWOOD, Ian. The solvent recovery handbook. Segunda edición. Inglaterra: Osney mead, 2002. p 92-100

**Cuadro 5.** (Continuación).

<b>Destilación.</b>	<b>Ventajas.</b>	<b>Desventajas</b>
Azeotropica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es utilizado para separar los componentes de los azeótropos existentes en un sistema con un disolvente; sin embargo, puede usarse cuando la separación es muy difícil.</li> <li>• Se utiliza para mezclas que no se pueden separar por destilación simple.</li> <li>• Tiende a aumentar el rendimiento de recuperación de los componentes de una mezcla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta restricciones en la selección del disolvente.</li> <li>• Debe separarse y recircularse a la parte superior de la columna el solvente o arrastrador que se emplea para remover los azeótropos.</li> <li>• No es una operación económicamente viable porque generalmente en el inicio requiere una destilación extractiva y luego dos operaciones en etapas múltiples.</li> </ul>
Extractiva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una operación que modifica la volatilidad relativa de los componentes de la mezcla.</li> <li>• Es más simple y empleada que la azeotropica.</li> <li>• El disolvente que utiliza para remover azeótropos puede recuperarse por destilación simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita un disolvente de punto de ebullición elevado para modificar la volatilidad de los compuestos.</li> <li>• La concentración del disolvente se debe mantener en la fase miscible y así mismo el calor sensible en un nivel razonable en el ciclo del solvente.</li> </ul>

**Cuadro 5.** (Continuación).

<b>Destilación.</b>	<b>Ventajas.</b>	<b>Desventajas</b>
Por lotes. <sup>132</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza una sola unidad, a diferencia de otros tipos de destilación.</li> <li>• Una sola columna de destilación por lotes bien diseñada puede separar las mezclas con cualquier número de componentes en sus constituyentes puros.</li> <li>• Para mezclas que tiene un alto contenido en sólidos con el uso de una unidad discontinua, se puede mantener los sólidos separados.</li> <li>• Permite la identificación del lote, es decir, la trazabilidad del producto.</li> <li>• Permite un adecuado retiro de sólidos en el proceso.</li> <li>• Con frecuencia se suele controlar manualmente pero también se puede automáticamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a que el funcionamiento no es permanente, se debe prestar mucha más atención al funcionamiento del equipo</li> <li>• Debido a la mayor retención en el equipo puede generar un daño potencial mediante una reacción</li> <li>• La destilación discontinua tiende a producir fracciones intermedias debido a la inmovilización inevitable en el sistema.</li> <li>• El mantenimiento de la operación por lotes, la carga de la cantidad fija y la eliminación de las cantidades de residuos calientes reducen las horas de funcionamiento disponibles y requieren el tiempo y la atención del operador.</li> </ul>

<sup>132</sup> PERRY, Robert H; GREEN, Don W. y MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico. Destilación. Séptima edición Madrid: McGraw-Hill, 2001. p 13-90. (volumen no. 2). ISBN 84-481-3343-9.

La operación de recuperación de solventes seleccionada para este caso, debido a que la cantidad necesaria de alimentación no es regular, hace que la destilación por lotes sea la que más se aplica, porque la cantidad de solvente a recuperar mensualmente es pequeña, es decir, 1191,25 kg (véase Tabla 20); ya que es más apta la operación para procesos de escala pequeña, en donde el número de etapas teóricas no son importantes<sup>133</sup>. Además por la flexibilidad que presenta en los procesos donde la composición química cambia frecuentemente, puede trabajar mezclas multicomponente con niveles aceptables de separación.<sup>134</sup>

Así mismo este proceso, tiene la facultad de predecir este grado de separación de mezclas con componentes orgánicos volátiles lo que implica que sea una operación capaz de separar mezclas de manera eficiente, por lo cual, es aplicado para la recuperación de solventes. También presenta costos bajos para separar componentes relativamente puros teniendo mayor ventaja sobre la destilación continua y mayor conveniencia por utilizar reflujo constante.

**Tabla 20.** Historial de producción.

<b>Periodo</b>	<b>Cantidad de residuos solvente (kg)</b>	<b>Cantidad de recuperado (kg)</b>
22/01/2016	1110,00	888,00
22/02/2016	1100,00	880,00
14/03/2016	877,50	702,00
08/04/2016	701,25	561,00
04/05/2016	867,50	694,00
03/06/2016	878,75	703,00
16/06/2016	975,00	780,00
07/07/2016	877,50	702,00
27/07/2016	1125,00	900,00
29/08/2016	225,00	180,00
30/08/2016	1125,00	900,00
24/09/2017	225,00	180'00
24/10/2016	1228,75	983,00
25/11/2016	1575,00	1260,00
23/12/2016	1403,75	1123,00

<sup>133</sup> KUN-KIM, Jeung y PYO-JU, Dong. Shortcut procedure for multicomponent batch distillation with distillate receiver. En: Ind Eng Chem Res. 1999. No.38, p. 1024-1031.

<sup>134</sup> LOMBIRA, J. y OTINIANO, M. Antecedentes y perspectivas de la operación de destilación discontinua. En: Per. Quim. Ing. 1998. vol. 1. No. 1. p. 53-65.



**3.3.1 Equilibrio vapor líquido sistema multicomponente.** En el proceso de separación se involucran tres fases (líquido, vapor y sólido), sin embargo, se supone que el sólido se separa completamente de la mezcla líquida, esto a su vez debido a que en la prueba de gravimetría se observó que el contenido de sólidos es pequeño (Ver capítulo 2), por lo cual no influye sobre el equilibrio termodinámico. Para las especies  $i$  en una mezcla de vapor, se define que:

$$f_i^v = y_i \phi_i P$$

Y para las especies  $i$  en una solución líquida:

$$f_i^l = x_i \gamma_i f_i$$

Se establece que estas 2 ecuaciones deben ser iguales  $f_i^v = f_i^l$  :

$$y_i \phi_i P = x_i \gamma_i f_i$$

**Ecuación 1.** Equilibrio líquido vapor sistema multicomponente.

$$y_i \phi_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat}$$

Teniendo en cuenta las desviaciones de la idealidad de las soluciones en la fase líquida, la ley de Raoult modificada se obtiene cuando  $\gamma_i$ , coeficiente de actividad se adiciona.

**Ecuación 2.** Ley de Raoult modificada

$$y_i P = \gamma_i x_i P_i^{sat}$$

**Ecuación 3.** Fracción vapor en equilibrio

$$y_i = \frac{\gamma_i x_i P_i^{sat}}{\phi_i P}$$

**Ecuación 4.** Fracción líquido en equilibrio

$$x_i = \frac{y_i \phi_i P}{\gamma_i P_i^{sat}}$$

### Ecuación 5. Fracción líquido normalizada.

$$x_{Ni} = \frac{x_i}{\sum_i x_i}$$

La presión de vapor se determina mediante la ecuación de Antoine, la cual describe la relación entre la temperatura y la presión de vapor de las sustancias puras.

### Ecuación 6. Ecuación de Antoine

$$\ln P_i^{sat} = A + \frac{B}{C + T} + D * \ln T + ET^F$$

### Ecuación 7. Temperatura de saturación

$$\ln P = A + \frac{B}{C + T_i^{sat}} + D * \ln T_i^{sat} + ET_i^{sat F}$$

**Tabla 21.** Constantes de Antoine

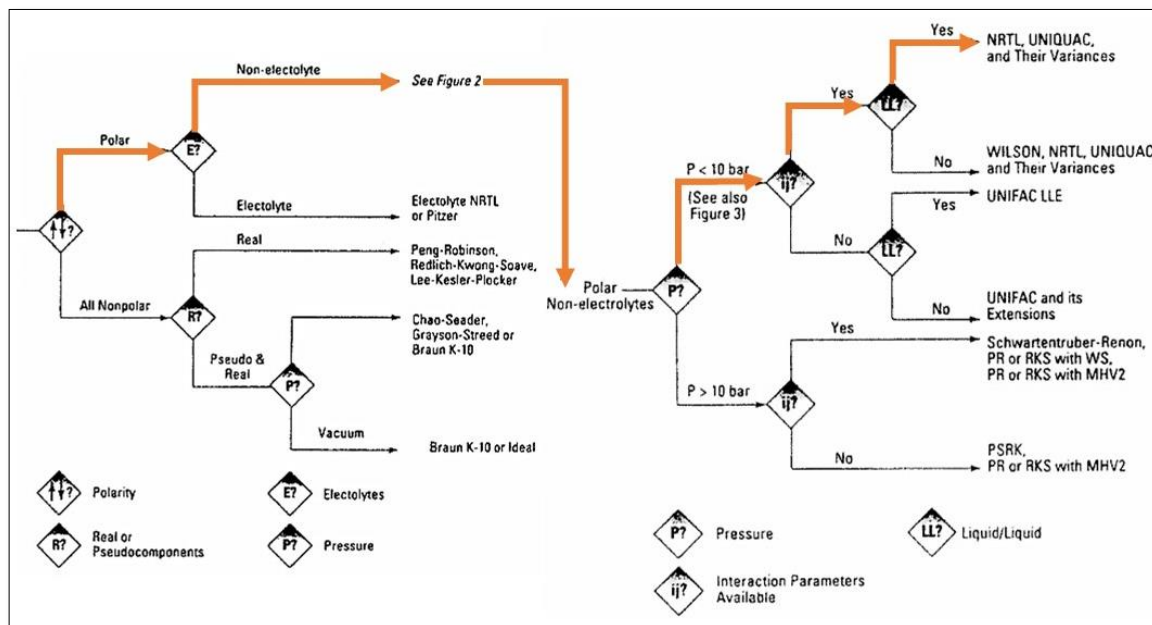
Sustancia	A	B	C	D	E	F
Etanol	86,486	-7931,1	0	-10,2498	6,39E-06	2
Metoxipropanol	55,425	-6886,7	0	-5,5896	2,46E-17	6
Propanol	79,4625	-8294,91	0	-8,90961	1,82E-06	2
N-propil acetate	98,6228	-8038,41	0	-12,4522	8,86E-06	2
Acetato de etilo	88,376	-7147,86	0	-10,9917	8,55E-06	2

**Fuente:** Aspen HYSYS V8.6. [programa de computador en disco]. Antoine vapour pressure. Aspen technology. 2015. System requirements: 2,22 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM

La determinación del coeficiente de actividad se estableció mediante el árbol de selección de Carlson<sup>135</sup>, conociendo de antemano la composición de la mezcla, la presión del sistema y la naturaleza de las sustancias involucradas, se definió que el modelo termodinámico que más se ajusta a dichas condiciones y por disponibilidad de parámetros es el NRTL. En la figura 7 se observa cómo se realizó la selección del modelo, de acuerdo a las condiciones de operación.

<sup>135</sup>CARLSON, Eric C. Don't gamble with physical properties for simulations. Chemical Engineering Progress. 1996. p. 36-46.

**Figura 7.** Selección modelo termodinámico a partir del diagrama de Carlson.



**Fuente:** CARLSON, Eric C. Don't gamble with physical properties for simulations. Chemical Engineering Progress.

El modelo NRTL es una extensión del concepto de Wilson aplicable a sistemas multicomponentes del tipo vapor-líquido, líquido-líquido, y vapor-líquido-líquido. Al requerir solo constantes de pares binarios, retiene hace que el método sea simple además de basarse en el parámetro  $\alpha_{ij}$ , se basa en una fracción molar de la especie considerada. Esta se expresa:

### Ecuación 8. Modelo NRTL

$$x_{ji} = \frac{x_j \exp(-\alpha_{ji}\tau_{ji})}{\sum_{k=1}^{NC} x_k \exp(-\alpha_{ki}\tau_{ki})}$$

La expresión que permite calcular los coeficientes de actividad para la fase líquida de mezclas multicomponentes en el modelo NRTL está dada por<sup>136</sup>:

<sup>136</sup> PRAUSNITZ, John y LICHTENTHALER, Rüdiger . Termodinámica molecular de los equilibrios de fases. Madrid: Pretice hall, 2000, p 210.

### Ecuación 9. Coeficiente de actividad modelo NRTL

$$\ln \gamma_i^L = \frac{\sum_{j=1}^{NC} \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^{NC} G_{ki} x_k} + \sum_{j=1}^{NC} \frac{G_{ij} x_j}{\sum_{k=1}^{NC} G_{kj} x_k} * (\tau_{ji} - \frac{\sum_{k=1}^{NC} \tau_{kj} G_{kj} x_k}{\sum_{k=1}^{NC} G_{kj} x_k})$$

Donde:

### Ecuación 10. Parametro Gji, NRTL

$$G_{ji} = \exp(-\alpha_{ji} \tau_{ji})$$

Los coeficientes  $\tau$  vienen dados por las siguientes expresiones:

### Ecuación 11. Coeficiente $\tau_{ij}$ , NRTL

$$\tau_{ij} = \frac{g_{ij} - g_{jj}}{RT}$$

### Ecuación 12. Coeficiente $\tau_{ji}$ , NRTL

$$\tau_{ji} = \frac{g_{ji} - g_{ii}}{RT}$$

Donde  $g_{ij}$ ,  $g_{ji}$  son las energías libre molares de Gibbs de interacción entre pares de moléculas. En las ecuaciones anteriores se debe considerar  $G_{ji} \neq G_{ij}$ ,  $\tau_{ij} \neq \tau_{ji}$ ,  $G_{ii}=G_{jj}=1$ ,  $\tau_{ii}=\tau_{jj}=0$ .

Las constantes de la ecuación NRTL para las sustancias involucradas se tomaron de la base de datos de Hysys Aspen.

**Tabla 22.** Constantes ecuación para NRTL

--	Etanol	Propanol	NPA	Metoxi	Acetato	$\alpha$
Etanol	0	3122,736	947,937	-561,891	1240,39	0,3
Propanol	-1909,14	0	298,514	-1922,062	392,428	0,3
NPA	-475,594	-319,105	0	-1467,698	535,626	0,3
Metoxi	1035,64	5487,552	2449,609	0	2709,21	0,3
Acetato	-716,228	-425,852	-463,923	-1642,71	0	0,3

**Fuente:** Aspen HYSYS V8.6. [programa de computador en disco]. Antoine vapour pressure. Aspen technology. 2015.System requirements: 2,22 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM

**3.3.2 Determinación punto de burbuja y rocío.** Los cálculos de la temperatura de burbuja y rocío requieren procesos iterativos dado que la resolución de un sistema de ecuaciones llega a ser complejo<sup>137</sup>. Los coeficientes de actividad son función de la temperatura y de la composición de la fase líquida. Ya que  $\sum_i y_i = 1$  y  $\sum_i x_i = 1$  la ecuación 2 es la suma sobre todas las especies y se obtiene:

$$1 = \sum_i \frac{x_i P_i^{sat} \gamma_i}{\phi_i P}$$

**Ecuación 13.** Deducción equilibrio haciendo  $y=1$

$$P = \sum_i \frac{x_i P_i^{sat} \gamma_i}{P}$$

**Ecuación 14.** Deducción equilibrio haciendo  $x=1$

$$1 = \sum_i \frac{y_i P}{\gamma_i P_i^{sat}}$$

La primera estimación para saber si una mezcla multicomponente producirá o no una mezcla de dos fases en equilibrio cuando se so mete a una operación de flash, a una temperatura y presión dadas, se puede obtener mediante los valores K.<sup>138</sup>

**Ecuación 15.** Coeficiente de reparto

$$k_i = \frac{y_i}{x_i}$$

Con respecto a la ecuación 15 se indica que el valor de K para la ley de Raoult modificada es:

**Ecuación 16.** Coeficiente de reparto para el equilibrio.

$$k_i = \frac{\gamma_i P_i^{sat}}{P}$$

Conforme a la relación de equilibrio (ecuación 15),  $y_i = K_i x_i$ . La suma con  $\sum_i y_i = 1$  produce:

<sup>137</sup> SMITH, J. y VAN NESS, H. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 5 ed. Mexico D.F.: McGraw Hill, 1997. p. 498-505.

<sup>138</sup> HENLEY, E.J y SEADER, J.D. Operación de separación por etapas. Barcelona: Editorial Reverté SA, 1968, p 332.

**Ecuación 17.** Relación equilibrio punto de burbuja

$$\sum_i K_i x_i = 1$$

En estos términos, para los cálculos del punto de burbuja, donde se conoce  $x_i$ , definiendo los valores de  $K$  que satisfagan la ecuación 17.

**Ecuación 18.** Relación equilibrio punto de rocío

$$\sum_i \frac{y_i}{K_i} = 1$$

De igual manera, conforme a la relación de equilibrio  $y_i/K_i=x_i$ . La suma con  $\sum_i x_i=1$ , para los cálculos del punto de rocío, donde se conoce  $y_i$ , definiendo los valores de  $K$  que satisfagan la ecuación 18.

La presión de vapor para cada especie  $P_i^{Sat}$  son funciones débiles de la temperatura, por lo cual se establece una nueva relación:

**Ecuación 19.** Presión de saturación  $P_j$

$$P_j^{sat} = P \sum_i \frac{y_i \phi_i}{\gamma_i} \left( \frac{P_j^{sat}}{P_i^{sat}} \right)$$

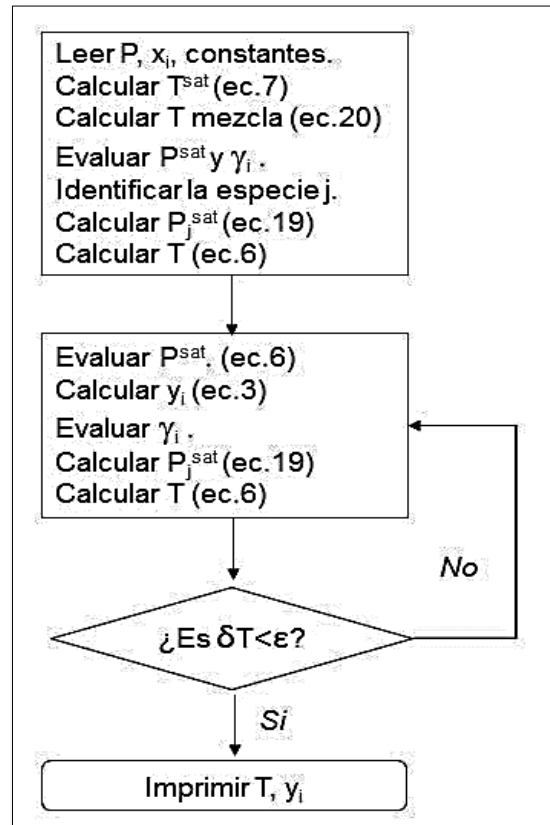
La sumatoria se debe hacer sobre todas las especies incluyendo a  $j$ , la cual es elegida del grupo de sustancias involucradas en la mezcla. La temperatura correspondiente a la presión de saturación se determina mediante la ecuación 7 en función de  $T$ , para encontrar la  $T$  inicial para dar comienzo al proceso iterativo. Para una estimación inicial se establece:

**Ecuación 20.** Temperatura de mezcla punto burbuja

$$T = \sum_i x_i T_i^{sat}$$

La figura 8 muestra el esquema iterativo para el cálculo de la temperatura de burbuja.

**Figura 8.** Algoritmo calculo temperatura de burbuja.



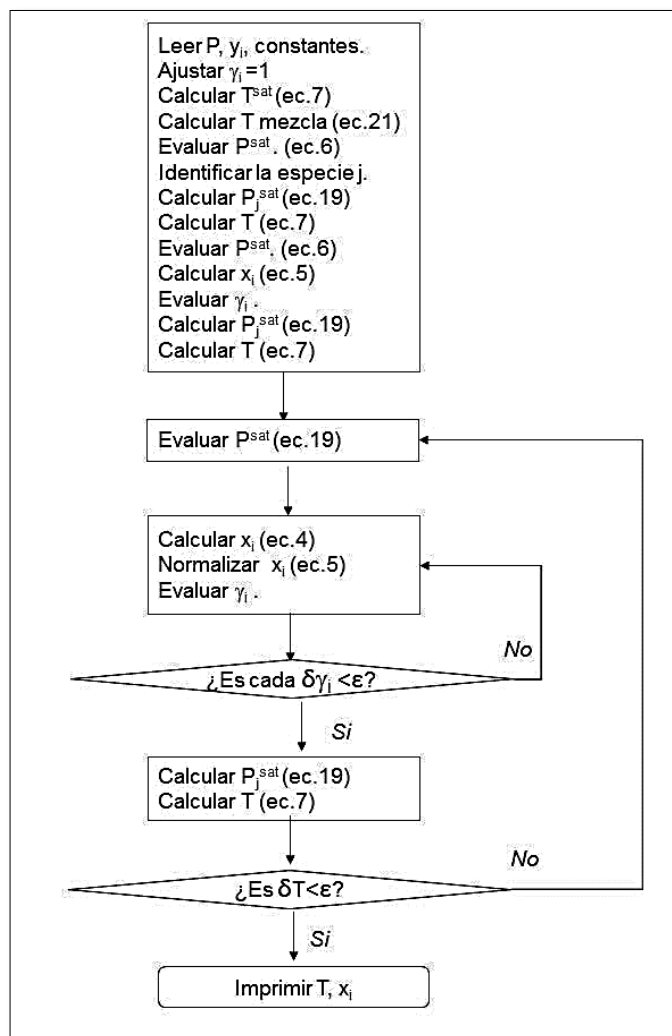
**Fuente:** SMITH, J. y VAN NESS, H. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. Mexico D.F: McGraw Hill, 1997. p. 498

En la figura 9 se muestra el esquema para la determinación del punto de rocío y como en el caso anterior el modelo iterativo es controlado por la temperatura mediante:

**Ecuación 21.** Temperatura de mezcla punto rocío

$$T = \sum_i y_i T_i^{sat}$$

**Figura 9.** Algoritmo cálculo temperatura de rocío



**Fuente:** SMITH, J. y VAN NESS, H. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. México D.F: McGraw Hill. 1997. P. 505

**Tabla 23.** Flujos másicos y molares

Compuesto	Peso Molecular (g/mol)	Fracción másica	Fracción molar
Etanol	46,07	0,1359	0,1919
Propanol	60,09	0,6069	0,6570
NPA	102,13	0,1485	0,0946
Metoxipropanol	90,12	0,0241	0,0174
Acetato de etilo	88,10	0,0729	0,0391



Mediante la ecuación 7, se calcula la temperatura de saturación para cada componente.

$$75 \text{ kPa} = \exp\left(86,486 + \frac{-7931,1}{T_{etanol}^{sat}} - 10,2498 * \ln T_{etanol}^{sat} + 6,39 \times 10^{-6} T_{etanol}^{sat^2}\right)$$

$$T_{etanol}^{sat} = 343,91 K$$

**Tabla 24.** Temperatura de saturación.

Compuesto	T <sup>sat</sup> (K)
Etanol	343,91
Propanol	362,57
N-propil acetato	365,12
Metoxipropanol	384,29
Acetato de Etilo	341,33

Con la ecuación 20, se calcula la temperatura de la mezcla:

$$T_{mix} = \sum_i (0,1919 * 343,91) + (0,6570 * 362,57) + (0,0946 * 365,12) + (0,0174 * 384,29) + (0,0391 * 341,33)$$

$$T_{mix} = 358,78 K$$

Se evalúa la presión de saturación a la temperatura de mezcla para cada componente.

$$P_{etanol}^{sat} = \exp\left(86,486 + \frac{-7931,1}{358,78} - 10,2498 * \ln 358,78 + 6,39 \times 10^{-6} 358,78^2\right)$$

$$P_{etanol}^{sat} = 135,11 \text{ kPa}$$

A partir de la ecuación 9 se determinó el coeficiente de actividad para cada componente, los resultados se ven en la tabla 25, según el algoritmo ahora se debe calcular  $P_j^{sat}$ , para esto se seleccionó arbitrariamente una especie de la mezcla, para este caso se seleccionó el acetato de etilo y a partir de esto se calcula la temperatura con la ecuación 7.

**Tabla 25.** Resultados presión de saturación

Compuesto	P <sup>sat</sup> (kPa)	γ <sub>i</sub>
Etanol	135,11	1,107
Propanol	64,347	1,0659
N-propil acetato	64,347	1,6352
Metoxipropanol	60,697	1,1971
Acetato de Etilo	133,27	1,5863

Con la ecuación 19 se determina el valor de  $P_j^{sat}$ , teniendo en cuenta que se seleccionó el acetato de etilo como componente j:

$$P_j^{sat} = 121,7968 \text{ kPa}$$

$$121,7968 \text{ kPa} = \exp(88,376 + \frac{-7147,86}{T_{AE}} - 10,9917 * \ln T_{AE} + 8,55 \times 10^{-6} T_{AE}^2)$$

$$T_{AE} = 355,9046 \text{ K}$$

Siguiendo los pasos del algoritmo (figura 8), se realiza el mismo procedimiento hasta que la temperatura converge y  $\Delta\epsilon$  sea de 0,0001, en la tabla 26 se muestran los resultados donde se obtuvo la temperatura de burbuja (355,9047K, 82,79°C).

**Tabla 26.** Resultados determinación punto de burbuja.

Compuesto	P <sup>sat</sup> (kPa)	y <sub>i</sub>	γ <sub>i</sub>
Etanol	121,1328	0,3431	1,1069
Propanol	57,1391	0,5335	1,0659
NPA	54,9765	0,1134	1,6352
1Me-2-pro	26,7904	0,0074	1,1971
Acetato	121,7968	0,1008	1,586

$$P_j^{sat} = 121,7967 \text{ kPa}$$

$$121,7967 \text{ kPa} = \exp(88,376 + \frac{-7147,86}{T_{AE}} - 10,9917 * \ln T_{AE} + 8,55 \times 10^{-6} T_{AE}^2)$$

$$T_{AE} = 355,90468 \text{ K}$$

$$\Delta\epsilon = 355,90468 - 355,9046 = 1,97 \times 10^{-5}$$

Para la determinación del punto de rocío, inicialmente se supone que el coeficiente de actividad tiene un valor igual a 1. Mediante la ecuación 7, se determinó la temperatura de saturación para cada compuesto:

$$75 \text{ kPa} = \exp\left(86,486 + \frac{-7931,1}{T_{\text{etanol}}^{\text{sat}}} - 10,2498 * \ln T_{\text{etanol}}^{\text{sat}} + 6,39 \times 10^{-6} T_{\text{etanol}}^{\text{sat}^2}\right)$$

$$T_{\text{etanol}}^{\text{sat}} = 343,91 \text{ K}$$

**Tabla 27.** Temperatura de saturación.

<b>Sustancia</b>	<b>T<sup>sat</sup> (K)</b>
Etanol	343,911
Propanol	384,287
NPA	362,573
Metoxi propanol	365,119
Acetato de etilo	341,328

A partir de estos datos y por medio de la ecuación 21 se obtiene la temperatura de saturación de la mezcla, con un valor de 350,45 K, con este valor se estima la presión de saturación para cada componente, los resultados se ven en la tabla 28.

$$P_{\text{etanol}}^{\text{sat}} = \exp\left(86,486 + \frac{-7931,1}{350,45 \text{ K}} - 10,2498 * \ln 350,45 \text{ K} + 6,39 \times 10^{-6} 350,45 \text{ K}^2\right)$$

$$P_{\text{etanol}}^{\text{sat}} = 97881,10 \text{ Pa}$$

**Tabla 28.** Presión de saturación a 350,45 K

<b>Sustancia</b>	<b>P<sup>sat</sup> (Pa)</b>
Etanol	97881,10
Propanol	45302,21
NPA	45311,86
Metoxi propanol	21516,33
Acetato de etilo	102167,93

Se calculan las fracciones molares de líquido para cada componente, mediante la ecuación 4 y con estos valores se estiman la fracción molar normalizada para cada componente ecuación 5 los resultados se ven en la tabla 29.

$$x_{etanol} = \frac{0,65502 * 75000 \text{ Pa}}{97881,10 \text{ Pa}} = 0,50189$$

$$x_{etanol} = \frac{0,50189}{0,50189 + 0,045764 + 0,348816 + 0,258694 + 0,023774} = 0,425717$$

**Tabla 29.** Fraccion molar líquida

Sustancia	$X_i$	$X_{Ni}$
Etanol	0,501896	0,425717
Propanol	0,045764	0,038818
NPA	0,348816	0,295871
Metoxi propanol	0,258694	0,219428
Acetato de etilo	0,023774	0,020165
Sumatoria	1,178945	1

La relación de equilibrio se determina a partir de la ecuación 16.

$$k_{etanol} = \frac{1 * 97881,10 \text{ Pa}}{75000 \text{ Pa}} = 1,30508$$

De acuerdo al algoritmo para la determinación del punto de rocío, se debe estimar el coeficiente de actividad y definir que la diferencia de  $\gamma_i$  calculado con el  $\gamma_i$  supuesto (1) sea menor.

**Tabla 30.** Relación de equilibrio y coeficiente de actividad.

Sustancia	$k_i$	$\gamma_i$	$\Delta\epsilon$
Etanol	1,3051	1,0575	0,05749
Propanol	0,6040	0,0901	-0,9099
NPA	0,6042	1,1404	0,1404
Metoxi propanol	0,2869	0,8360	-0,1640
Acetato de etilo	1,3622	0,9717	-0,0283

Como se cumple con la relación se prosigue con el procedimiento. Ahora se debe calcular la  $P_j^{Sat}$ , donde se selecciono al etanol como especie j, para ello se calculo el valor de  $y_i$  para cada especie (ecuación 3).

$$y_{etanol} = \frac{1,0574936 * 0,501896 * 97881,10 \text{ Pa}}{75000 \text{ Pa}} = 0,69267$$

$$P_j^{sat} = 115,39 \text{ kPa}$$

**Tabla 31.** Parametros para  $P_j^{Sat}$ 

$y_i$	$y_i/\gamma_i$	$P_j^{sat}/P_i^{sat}$
0,6927	0,6550	1,0000
0,0025	0,0276	2,1606
0,2403	0,2107	2,1602
0,0620	0,0742	4,5492
0,0315	0,0324	0,9580

Con el valor de  $P_j^{Sat}$  se determina un nuevo valor de temperatura para la especie j y se establece la diferencia entre las temperaturas calculadas hasta que se cumpla  $\Delta T < \varepsilon$ . A partir del modelo iterativo se obtuvo que la temperatura de rocío converge cuando es igual a 361,922 K (88,773°C). En la tabla 32 se muestran los resultados donde convergió la temperatura de rocío.

**Tabla 32.** Resultados determinación punto de rocío.

Sustancia	$\gamma$	$P^s$ (Pa)	$X_i$	$X_{Ni}$	$K_i$
Etanol	1,0575	151891,33	0,3234	0,4216	2,0252
Propanol	0,1100	73075,66	0,0284	0,0370	0,9743
NPA	1,1384	67487,73	0,2342	0,3053	0,8998
Metoxipropanol	0,8606	33830,05	0,1645	0,2145	0,4511
Acetato de etilo	0,9825	146777,17	0,0165	0,0216	1,9570

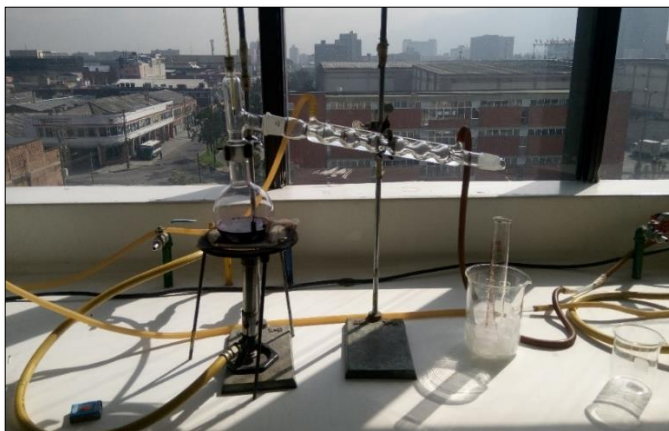
**3.3.3 Prueba de destilación.** La prueba de destilación se realizó para obtener la respectiva curva destilación conforme al método establecido por NTC 619<sup>139</sup>, donde se tomó la temperatura y el volumen del condensado para que el resultado se refleje en forma de la temperatura de ebullición en función del volumen del destilado, la prueba se realizó por duplicado. En el anexo J se muestra el procedimiento que se utilizó para llevar a cabo esta prueba.

En la figura 10 se muestra el montaje experimental utilizado corresponde a un montaje simple, para cada destilación se tomó una muestra de 100 mL del residuo, con una probeta graduada se recogieron intervalos de 10 mL de condensado, para reducir las pérdidas por evaporación del destilado se depositó la probeta en un recipiente que contenía un baño de agua fría. La probeta se ubicó de tal forma que

<sup>139</sup>INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Método de ensayo para el intervalo de destilación de líquidos orgánicos volátiles. NTC 619. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008.

quedara justo debajo de la salida del condensador, con el fin de reducir salpicaduras y así obtener una mejor recolección del condensado, para medir la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio.

**Figura 10.** Montaje prueba de destilación simple.



La tabla 33 muestra los resultados obtenidos en la destilación simple que se realizó por duplicado y de acuerdo a estos resultados, se realizó la curva de destilación.

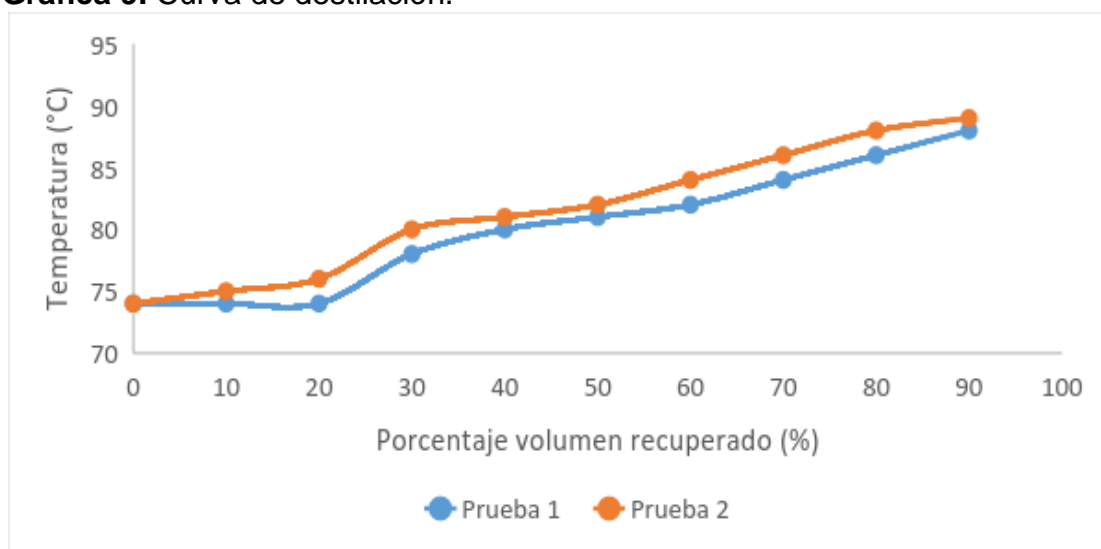
**Tabla 33.** Resultado destilación de la muestra de residuo.

Prueba 1			Prueba 2		
Volumen (mL)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Volumen (mL)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
10	74	8,08	10	75	4,24
20	74	11,09	20	76	6,22
30	78	17,32	30	80	9,55
40	80	20,26	40	81	12,41
50	81	23,05	50	82	14,59
60	82	26,24	60	84	26,05
70	84	29,40	70	86	28,12
80	86	33,11	80	88	32,62
90	88	36,42	90	89	39,18

**Tabla 34.** Desviación prueba de destilación

% de volumen recuperado	T(°C) Prueba 1	T(°C) Prueba 2	T(°C) Promedio	Desviación
10	74	75	74,5	0,5
20	74	76	75,0	1,0
30	78	80	79,0	1,0
40	80	81	80,5	0,5
50	81	82	81,5	0,5
60	82	84	83,0	1,0
70	84	86	85,0	1,0
80	86	88	87,0	1,0
90	88	89	88,5	0,5

En la figura 11 se puede observar el residuo antes y después de realizar la prueba de destilación.

**Gráfica 9.** Curva de destilación.

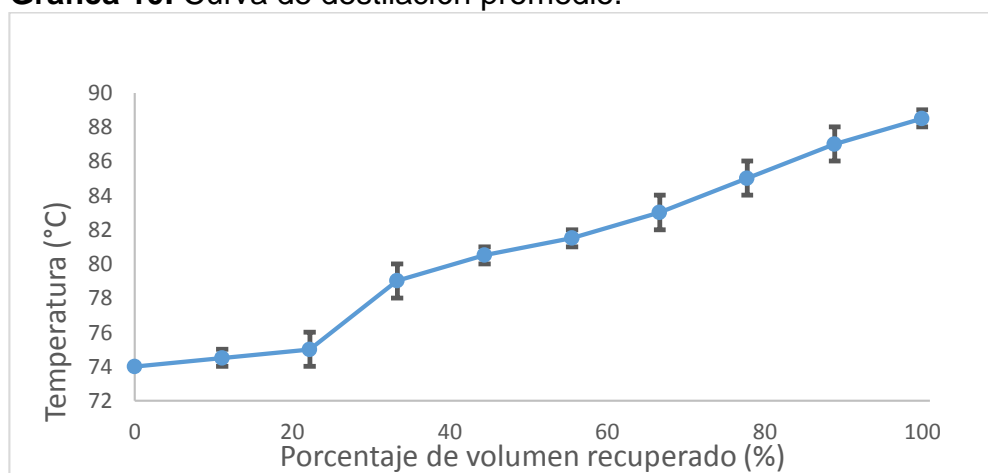
De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 33 y gráfica 9, se establece la temperatura experimental inicial y final de ebullición de la mezcla es de 74 y 88,5 °C respectivamente, durante la experimentación se encontraron variables no controlables como la temperatura en la destilación, ángulo de inclinación del condensador, temperatura del agua de refrigeración entre otros, esto porque se disponía de dos montajes diferentes de destilación simple (Ver figura 10) a pesar de ser el mismo sistema, lo cual dificulta el manejo de dichas variables, según esto se establece que el control de la temperatura juega un papel muy importante en la operación. Además, al comparar la temperatura de burbuja calculada con la temperatura inicial de destilación observada en el laboratorio se observó una

diferencia de aproximadamente 7 grados, esto se pudo haber dado por las variables que se mencionaron anteriormente y por la resolución del termómetro, se pudieron haber leído los valores mal, sin embargo, la temperatura de rocío es similar la diferencia es inferior a un grado.

**Figura 11.** Residuo de la prueba de destilación.



**Gráfica 10.** Curva de destilación promedio.



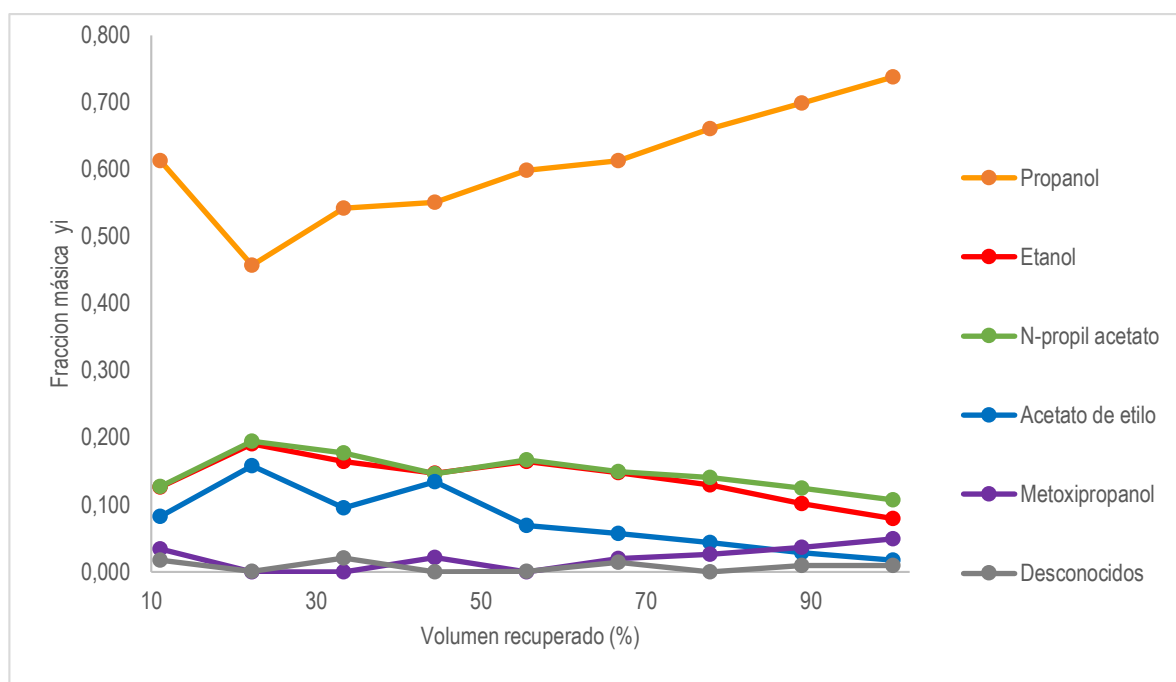
Para evaluar el ajuste de los datos se comparó los valores experimentales de las dos pruebas de destilación con el promedio, en la Tabla 32 presenta los valores promedio y desviación para el ensayo de curva de destilación. Se puede observar que la desviación entre la prueba 1 y 2 no es significativo, esto se pudo haber dado por la resolución del termómetro (1°).

Analizando la curva de destilación promedio (gráfica 10), se observó que el porcentaje de recuperado aumenta a medida que incrementa la temperatura de destilación. De este modo se puede decir que los componentes más volátiles se encontrarán en mayor proporción en las primeras fracciones de destilado.



De cada fracción se tomaron 10 muestras de las pruebas anteriores (nueve de destilación a condiciones ambiente y una décima al vacío), la composición de destilado de cada muestra tomada se determinó mediante cromatografía de gases (Ver anexo K) realizada en la empresa Tintas S.A. De acuerdo a la información brindada por la empresa, la composición de las fracciones destiladas se obtuvo usando la técnica de cromatografía de gases, utilizando una columna Perkin Elmer Autosystem XL PE-5, con dimethyl posiloxane como fase estacionaria y helio como gas portador o fase móvil. Se inyectaron alícuotas de muestra de  $1,5 \text{ mg}^{-1}$ . Los análisis se realizaron bajo las siguientes condiciones de temperatura y presión de operación  $105,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3447,37 \text{ kPa}$ , respectivamente.

**Gráfica 11.** Evolución de la composición en el destilado para cada fracción



Mediante el método de diferencias finitas se determinó la evolución del proceso de destilación (Ver gráfica 11), en esta gráfica se observa que obtiene mayor volumen de recuperación respecto a los compuestos menos volátiles como propanol, n-propil de acetato y etanol, mientras que la recuperación de compuestos como metoxipropanol y desconocidos son despreciables, por lo cual estos últimos no afectan la calidad de recuperado solvente.

Como residuo de la destilación se obtiene un lodo, que dadas las características de las materias primas involucradas está compuesto por resinas sintéticas, aditivos y pigmentos, lo cual se encuentra especificado en las fichas técnicas de la tinta blanca

como la común entre las tintas utilizadas en el prelistamiento de la operación de impresión (Ver anexo A).

La relación entre el peso inicial del residuo solvente que se determinó utilizando un picnómetro de 25 mL (Ver figura 12), debido a que no se pudo pesar el balón con este residuo porque superaba la capacidad de la balanza analítica, para estos se determinó la densidad de la mezcla, pesando el picnómetro vacío y luego pesarlo nuevamente pero con la mezcla con estos datos se pudo determinar el peso de la mezcla y el porcentaje de sólidos, en la tabla 35 se puede observar que es en la prueba dos donde se queda la mayor cantidad de componentes volátiles de la mezcla.

**Tabla 35.** Resultado destilación residuo sólido.

--	Prueba 1	Prueba 2	Promedio	Desviación
Peso inicial residuo solvente (g)	86,674	86,674	86,674	0,000
Peso final lodo sólido(g)	8,947	9,456	9,202	0,255
Porcentaje (%)	10,32	10,91	10,616	0,294

**Figura 12.** Determinación densidad de la mezcla



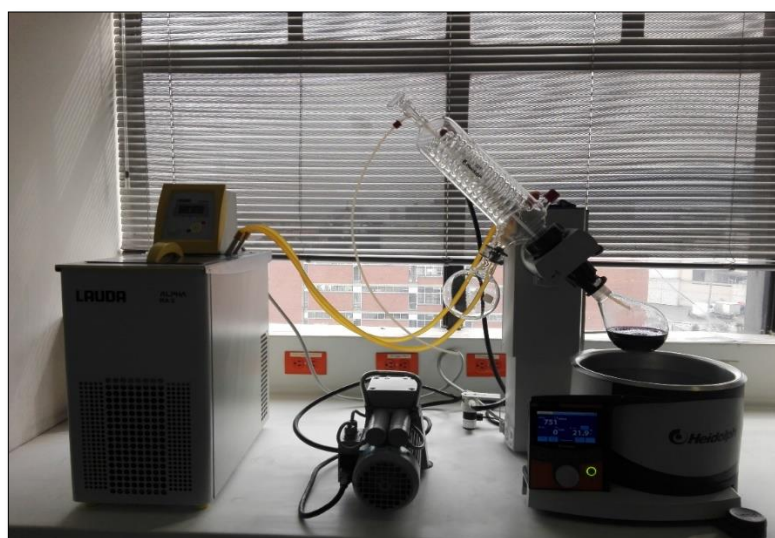
Por separado, se realizaron dos pruebas de destilación con un rotaevaporador al vacío (Ver figura 13), para observar el efecto de la presión sobre el sistema, para ello se tomaron 200 mL de residuo, ajustando las condiciones de destilación según el manual del equipo de la siguiente manera: la temperatura del baño de 60°C, temperatura de vapor de 40°C y la temperatura de agua de refrigeración máximo 20°C. Sin embargo, no se llevó a cabo la destilación hasta resequedad total, por lo que el residuo sólido podía quedarse adherido al balón (Ver figura 11). Además, con los resultados mostrados en la tabla 36, se puede afirmar que se obtiene una mayor recuperación de residuo solvente cuando se trabaja con una presión alta al vacío y por ende tarda más tiempo en llevarse a cabo la destilación. Sin embargo, lo más conveniente es realizar la recuperación de dicho residuo a condiciones ambientales, debido a que los componentes que lo integran tienen bajos puntos de ebullición (Ver

numeral 2.1) y por costos; ya que se prefiere operar al vacío cuando se trata de solventes con altos puntos de ebullición usados para impresión de fotopolímeros.

**Tabla 36.** Resultado destilación al vacío.

--	Prueba 1	Prueba 2
Presión (mbar)	130	175
Temperatura destilación (°C)	78,4	60,0
Volumen inicial residuo (mL)	200	200
Volumen recuperado (mL)	173	182
Tiempo destilación (min)	131	190

**Figura 13.** Montaje de destilación al vacío.



La presión de vacío se seleccionó de acuerdo a las especificaciones del equipo, donde se debe identificar el componente en mayor proporción en la mezcla, es decir, el etanol, disolvente encontrado en la tabla de datos del manual, el cual tiene establecido las condiciones de temperatura y presión para trabajar al vacío.

**3.3.4 Cromatografía de gases.** Posteriormente se les realizó este análisis a las diez muestras del destilado (nueve de destilación simple y una de destilación al vacío) en la empresa Tintas S.A, para analizar la recuperación, la temperatura y la mezcla más apta para la operación de impresión.

De los resultados cuantitativos de las cromatografías de gases (Ver anexo K), se, se optaría por mezclar fracción 8 y 9 para dilución de tintas, siendo las mezcla más aptas para mantener la tinta estabilizada y permitiría su buen desempeño. Además, se seleccionó como la mezcla más conveniente para el proceso de impresión porque en cuanto a composición es lo más cercano a 80% propanol y 20% N- propil acetato, siendo la proporción recomendada para diluir tintas respecto a la flexografía

(Ver anexo A) y lo cual venden los proveedores respecto de las materias primas que utilizan para esta operación.

Mientras que respecto al lavado de las unidades de impresión se prefiere mezclar las fracciones 2 y 3, 2 y 4,2 y 5. En algunos resultados de las cromatografías como se observa en la tabla 37, se obtuvieron componentes desconocidos porque el destilado arrastro componentes del lodo, debido a variables no controlables como la temperatura y contaminación que pudo haberse dado durante la experimentación, por lo que se trata de componentes volátiles. Sin embargo, estos compuestos desconocidos tienen una proporción despreciable, por lo cual no afectan la operación de impresión.

**Tabla 37.** Resultados de la cromatografía de gases de las fracciones de destilado.

<b>Sustancia</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>	<b>F6</b>	<b>F7</b>	<b>F8</b>	<b>F9</b>
Propanol	61,34	45,69	54,24	55,13	59,91	61,3	66,08	69,88	73,77
Etanol	12,6	19,05	16,47	14,72	16,45	14,74	12,91	10,14	7,95
NPA	12,7	19,43	17,75	14,61	16,72	14,94	14,07	12,49	10,7
Acetato de etilo	8,23	15,81	9,51	13,43	6,9	5,7	4,35	2,87	1,75
Metoxipropanol	3,37	0	0	2,11	0	1,95	2,59	3,65	4,91
Desconocidos	1,75	0,02	2,03	0	0,02	1,37	0	0,97	0,92

Con los resultados obtenidos en la caracterización, se realizó un balance de materia por componente, partiendo de los resultados de la prueba de destilación que se muestra en la sección 3.3.4, como corriente de entrada se tomaron los resultados obtenidos de la cromatografía realizada a la muestra que fue destilada por rotaevaporador (Ver tabla 38).

**Tabla 38.** Resultados CG fracción rotaevaporador.

<b>Sustancia</b>	<b>Fracción</b>
Propanol	60,69
Etanol	13,59
NPA	14,85
Acetato de etilo	7,29
Metoxipropanol	2,41
Desconocidos	1,17

Para la prueba se utilizaron 100 mL de residuo, de los cuales se obtuvieron 90 mL de destilado y un lodo (Ver tabla 35), utilizando los resultados obtenidos en la prueba de gravimetría para determinar la composición del lodo y teniendo en cuenta que el residuo ingresa al proceso con cierta humedad y que durante el proceso ganara humedad, se procedió de la siguiente manera:

En la tabla 13 de la sección 2.3.2.2 se muestra el contenido de sólidos totales equivalente al 4,7573% (m/m). Los sólidos volátiles corresponden a la diferencia tomando una base de 100 equivalentes al 95,2427% (m/m). El porcentaje de humedad corresponde al 2,1680% (Ver sección 2.3.2.3) partiendo de estos resultados se determina el porcentaje m/m de solventes o compuestos orgánicos volátiles presentes en la mezcla.

**Ecuación 22.** Porcentaje compuestos orgánicos volátiles

$$\% \text{ Solventes} = \% \text{ Sólidos volátiles} - \% \text{ Humedad}$$

$$\% \text{ Solventes} = 95,2427 - 2,1680 = 93,0747\%$$

A continuación, se relaciona la muestra de cálculo realizada para un componente de la mezcla, partiendo de la medición del peso promedio de residuo realizado en el laboratorio fue de 86,674 (ver tabla 38) y las composiciones obtenidas mediante cromatografía de gases que para la corriente 1 corresponde a los resultados de la prueba realizada con rotaevaporador y la corriente 2 a las fracciones tomadas durante la prueba de destilación. Los resultados de las pruebas mencionadas se muestran en la tabla 39.

**Tabla 39.** Datos de entrada balance de materia.

Compuesto/%m/m	Corriente 1	Corriente 2
Propanol	60,69	60,81
Etanol	13,59	13,89
N-propil acetato	14,85	14,82
Acetato de etilo	7,29	7,62
Metoxipropanol	2,41	2,07
Desconocidos	1,17	0,79

Balance por componente.

$$M_1 * X_{1 \text{ etanol}} = M_2 * X_{2 \text{ etanol}} + M_3 * X_{3 \text{ etanol}}$$

$$X_{3 \text{ etanol}} = \frac{M_1 * X_{1 \text{ etanol}} - M_2 * X_{2 \text{ etanol}}}{M_3}$$

$$X_{3 \text{ etanol}} = \frac{86,6740 \text{ g} * 0,1265 - 77,4725 \text{ g} * 0,1368}{9,202 \text{ g}} = 0,0399$$

Como se mencionó anteriormente, se ha tenido en cuenta el porcentaje de humedad, porque durante el proceso ingresara y se ganara humedad del ambiente, por ello es importante tener en cuenta esto.

$$M_1 * X_{1 H_2O} = M_2 * X_{2 H_2O} + M_3 * X_{3 H_2O}$$

$$X_{3 H_2O} = \frac{M_1 * X_{1 H_2O} - M_2 * X_{2 H_2O}}{M_3}$$

$$X_{3 H_2O} = \frac{86,6740 \text{ g} * 0,0217 - 77,4725 \text{ g} * 0,0154}{9,202 \text{ g}} = 0,0746$$

Los resultados del balance de materia por componente se pueden apreciar en la figura 14. De acuerdo a esto resultados se puede conocer el contenido de sólidos presentes en el lodo.

**Figura 14.** Diagrama de proceso destilación



A partir del balance realizado y teniendo en cuenta los usos del destilado, se determinaron las fracciones para usar como solvente en la tinta y en el lavado corresponde a propanol 59,87%, metoxipropanol 2,03% y NPA 14,59% para la dilución de tintas y en la operación de lavado de las unidades de impresión se toman todos los componentes del destilado a excepción del metoxipropanol porque no se requiere para el lavado.

La importancia radica en la selección del método de separación más adecuado para el residuo y basado en esto se realizaron las pruebas a nivel de laboratorio, donde se definieron las condiciones iniciales a partir del equilibrio liquido-vapor, con el fin de observar el comportamiento de la mezcla durante la separación y definir las

condiciones de operación del equipo, adicionalmente a partir de las cromatografías se determinó la mezcla más adecuada para mantener la tinta estabilizada durante la proceso de impresión.

## 4. SISTEMA DE RECUPERACIÓN

Como se observó en los capítulos anteriores, el resultado de este trabajo de grado fue la selección un método de separación para el residuo mostrado en el diagnóstico. De acuerdo a esto, se ha propuesto como alternativa el estudio y selección de un destilador discontinuo o batch.

### 4.1 DESTILACIÓN BATCH

La destilación discontinua o batch es un proceso que generalmente se usa para separar mezclas de pequeños volúmenes, recuperación de solventes, polimeros, productos bioquímicos obtención de productos farmacéuticos y biotecnológicos<sup>140</sup>. A menudo, el mismo equipo puede usarse para múltiples operaciones, permite fácilmente modificar este proceso para producir diferentes productos, esta operación favorece la limpieza del equipo y reduce el inventario de materias primas<sup>141</sup>.

La operación de una columna de destilación discontinua se puede describir en tres partes: el período de puesta en marcha, el período de producción, y el período de parada. Antes de la puesta en marcha, la alimentación se carga normalmente al rehervidor y luego se calienta. En este tipo de destilación para mezclas multicomponente, el componente más volátil se retira primero, luego el segundo más volátil y así sucesivamente hasta que queda el componente más pesado para el final por lo que a medida que el tiempo avanza el material que se destila se vuelve menos rico en los componentes más volátiles y el corte se puede detener cuando se ha alcanzado un valor deseado de composición del destilado acumulado<sup>142</sup>.

Durante el período de puesta en marcha, el sistema se hace funcionar bajo reflujo total, es decir, sin ningún producto retirado de la parte superior, hasta que se alcanza un estado estacionario o el producto de la composición de destilación alcanza una pureza deseada. El período de producción es normalmente el que consume más tiempo, en el período de producción, se elimina continuamente una fracción del condensado. A medida que transcurre el tiempo, el material que se destila se vuelve menos rico en los componentes más volátiles y la destilación de

---

<sup>140</sup> NARVÁEZ, A. ZAVALA, J. ROCHA, A y RUBIO, C. Método corto para la destilación discontinua multicomponente considerando una política de reflujo variable. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Octubre, 2012. no. 3. vol. 12. p.621-622.

<sup>141</sup> TURTON, Richard et al. Analysis, synthesis and design of chemical processes. The Structure and Synthesis of Process Flow Diagrams. 3 ed. Estados Unidos: Pearson Education, Inc.2009. p. 71. ISBN 0-13-512966-4.

<sup>142</sup> SORENSEN, Eva. Distillation fundamentals and principles. Design and operation of batch distillation. London: Elsevier Inc.2014. p. 187-221



un corte se detiene cuando la composición del destilado acumulado alcanza el valor deseado.<sup>143</sup>

Por otra parte, este tipo de operación permite obtener la misma cantidad de producto y la misma pureza en promedio, pero lo que difiere es el tiempo de operación. La destilación por lotes o discontinua utiliza dos modos de operación.<sup>144</sup>

- Reflujo constante: la relación de reflujo se ajusta a un valor predefinido, que se mantiene durante la duración del corte dado. La destilación se continúa hasta que el destilado medio ha alcanzado el valor deseado, y después se cambia el corte.
- Reflujo variable: cuando se desea mantener una composición de destilación constante, se debe aumentar constantemente el reflujo a lo largo del corte o de la operación. A medida que avanza el tiempo, el componente más volátil se está continuamente agotando. La relación de reflujo aumentara progresivamente.

Aunque las operaciones para cada modo de operación pueden dar la misma cantidad de producto con la misma pureza, el tiempo total requerido para cada operación difiere generalmente. En el caso de una operación de reflujo constante, la composición del producto se deja variar, permite controlar el flujo, pero el reflujo se mantiene constante, es decir, que la relación de reflujo utilizada puede ser mayor que la necesaria al comienzo del corte, y por lo tanto el producto destilado tiene una pureza muy por encima de la especificación<sup>145</sup>. Por otra parte, hacia el final del corte, la relación de reflujo es demasiado baja y el producto destilado está entonces por debajo de la especificación<sup>133</sup>.

El diseño de una columna de destilación por lotes es similar al diseño de una columna de destilación continua en la que deben determinarse los siguientes parámetros principales<sup>146</sup>:

- Número de etapas o placas en la sección de columna (y por lo tanto la altura de la columna).
- Diámetro de la columna.
- Tamaño del rehervidor (tamaño del lote y área de transferencia de calor)

---

<sup>143</sup> KOROVISSI, Ekaterini; LINNINGER, Andreas. Batch processes. New York: Taylor y Francis group, 2006. p. 107

<sup>144</sup> SMALLWOOD, I, N, The Solvent Recovery Handbook. Segunda edición. USA and Canada: Blackbell Science Ltd, 2002. p. 231. ISBN 0-8493-1602-2

<sup>145</sup> COUPER R, James R et al. Chemical process equipment. Distillation and gas Absorption. 2 ed. Estados Unidos: Elsevier's Science & Technology Rights. 2005. p. 415 ISBN 0-7506-7510-1.

<sup>146</sup> RICHARDSON, J., F. Particle technology and separation processes. Oxford: Elsevier Ltd, 2002, p. 592.

- Tamaño del condensador (área de transferencia de calor)
- Tamaño del tambor de reflujo

Usualmente para este tipo de proceso se hacen las siguientes suposiciones<sup>147</sup>:

- Derrame constante del líquido.
- Volatilidad relativa constante.
- Tasa de ebullición constante.
- Condensador total cuando se fija la relación de reflujo o destilado, mientras que las composiciones varían con el tiempo<sup>148</sup>.
- Mezcla perfecta tanto para el rehervidor como para las etapas.
- Presión constante en cada etapa.
- Flujo de vapor constante.
- Reflujo líquido constante.
- Equilibrio en cada etapa.
- Los atascos de vapor se consideran insignificantes.
- Estado cuasi-estacionario.

Esta operación, presenta las siguientes ventajas en determinados casos<sup>149</sup>:

- Cuando la capacidad de la planta es demasiado pequeña, para permitir una operación continúa.
- Las composiciones para la destilación varían con el tiempo o de lote a lote.
- Cuando la alimentación contiene sólidos como resinas o alquitranes, el uso de destilación por lotes permite mantener separados los sólidos y la remoción al final del batch.
- Cuando se requiere producir un nuevo producto para evaluar los compradores potenciales.

Se pretende emplear el método corto debido a que es un procedimiento aplicable para la destilación batch multicomponente bajo condiciones como condensador total, derrame constante del líquido entre otras suposiciones mencionadas en este

---

<sup>147</sup> VELASCO GONZÁLES, Juan R et al. Improvements in batch distillation startup. En: Eng Chem Res. Diciembre, 1986. No.26, p. 745-750.

<sup>148</sup> SORENSEN, E y SKOGESTAD, S. Optimal startup procedures for batch distillation. En: Elsevier Science Ltd.1996.vol.20. No.96, p. 57.

<sup>149</sup> SEADER, j; HENLEY, Ernest.; ROPER, D. Separation Process principles. Batch distillation.3 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.2011. p. 473. ISBN 978-0-470-48183-7.

capítulo<sup>150</sup>, éste considera la reducción en tiempos de cómputo y tiene una precisión aceptable en relación a los métodos rigurosos<sup>151</sup>. Este modelo permite estimar las composiciones en el destilado y fondos .Sundaram y Evans<sup>152</sup> desarrollaron un método corto bajo reflujo constante basados en el balance global de materia y en el balance por componente. Las ecuaciones que conforman el método corto desarrollado por Sundaram y Evans:

**Ecuación 23.** Balance de materia global destilación por lotes

$$B_{Nueva} = B_{Anterior} - \left( \frac{V}{1 + R} \right)_{Anterior} \Delta t$$

**Ecuación 24.** Balance por componente destilación por lotes.

$$x_{B,nueva}^{(i)} = x_{B,anterior}^{(i)} + \left( x_D^{(i)} - x_B^{(i)} \right)_{anterior} \left( \frac{B_{Nueva} - B_{Anterior}}{B_{Anterior}} \right)$$

**Ecuación 25.** Ecuación de Fenske

$$N_{min} = \frac{\text{Log} \left[ \left( \frac{x_D^{(i)}}{x_B^{(i)}} \right) \left( \frac{x_B^{(k)}}{x_D^{(k)}} \right) \right]}{\text{Log} \alpha_{i,k}}$$

Despejando de la ecuación 25 la composición del destilado queda:

$$x_D^{(i)} = x_B^{(i)} \left( \frac{x_D^{(k)}}{x_B^{(k)}} \right) \alpha_{i,k}^{N_{min}}$$

$$x_D^{(k)} = \frac{x_B^{(k)}}{\sum_{i=1}^c x_B^{(i)} \alpha_{i,k}^{N_{min}}}$$

<sup>150</sup> KIM, Jeung Kun y JU Dong Pyo Ju. Shortcut Procedure for Multicomponent Batch Distillation with Distillate Receiver. En: Ind. Eng. Chem. Res. 1999. no. 38. p.1024-1031.

<sup>151</sup> NARVÁEZ GARCÍA, A. et al. Shortcut method for multicomponent batch distillation considering a variable reflux policy. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Julio, 2013. vol. 12, no. 3. p. 621-637.

<sup>152</sup> Sundaram y L.B., Evans. Shortcut Procedure for Simulating Batch Distillation Operations. En: Ind. Eng. Chem. Res. 1993. no. 32. p.511-518.

**Ecuación 26.** Ecuación de Gilliland.

$$Y = 1 - EXP \left( \frac{(1 + 54,4X)(X - 1)}{(11 + 117,2X)\sqrt{X}} \right)$$

**Ecuación 27.** Ecuación de Gilliland.

$$Y = 1 - EXP \left( \frac{(1 + 54,4X)(X - 1)}{(11 + 117,2X)\sqrt{X}} \right)$$

Donde:

$$Y = \frac{N - N_{min}}{N + 1}$$

$$X = \frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

**Ecuación 28.** Ecuación de Eduljee.

$$Y = 0,75 - X^{0,5668}$$

**Ecuación 29.** Ecuacion de Underwood

$$R_{min} = \frac{\left( \frac{x_{D LK}}{x_{B LK}} \right) - \alpha_{LK,HK} \left( \frac{x_{D HK}}{x_{B HK}} \right)}{(\alpha_{LK,HK} - 1) \sum_{i=1}^c x_B^{(i)} \alpha_{i,k}^{N_{min}}}$$

Al remplazar la ecuación 25 en 29 se tiene:

$$R_{min} = \frac{\alpha_{LK,HK}^{N_{min}} - \alpha_{LK,HK}}{(\alpha_{LK,HK} - 1)}$$

Donde LK hace referencia al componente más volátil y HK es el componente más pesado.

Para solucionar este modelo, inicialmente se debe conocer la composición y cantidad de alimentación, flujo de vapor a través de la columna, volatilidades relativas ( $\alpha_i$ ) de los componentes de la mezcla y el componente de referencia (k). A partir de estos datos se obtiene el número de etapas teóricas mínima ( $N_{min}$ ) que es un valor necesario para calcular las composiciones del destilado, mediante el uso de la ecuación de Fenske, seguido a esto se debe calcular la cantidad de reflujo mínima ( $R_{min}$ ) cuyo valor se usa para calcular la relación de reflujo. La relación de

reflujo se calcula el valor de la cantidad de destilado y mediante balance de materia global y por componente se calcula fondos y su composición.

Inicialmente, se calculó el coeficiente de reparto expresado como la relación de concentraciones en ambas fases, dependiente de la temperatura y teniendo en cuenta la presión a la que se va a trabajar, se optó por usar la ecuación de Antoine que describe la relación entre la temperatura y la presión de saturación del vapor, teniendo en cuenta que se conocen las composiciones en la alimentación dichas temperaturas se pueden calcular la temperatura de burbuja y rocío, con el método de la sección 3.3.2 de 355,90 K y 361,92 K respectivamente.

Con los valores del coeficiente de distribución se calculó la volatilidad relativa, definida como la razón de los valores K del componente más volátil a uno de los menos volátiles. Si la volatilidad relativa es alta, un componente tiene una tendencia mucho mayor a vaporizar (es más volátil) que el otro, y será fácil separarlos uno del otro mediante la vaporización de uno; del otro lado cuando la tendencia a vaporizar de los componentes es similar, la volatilidad relativa se acerca a la unidad. Para efectos de los cálculos se seleccionó el n-propil acetato como el compuesto clave con volatilidad intermedia. A partir de dichos cálculos se determinó que los componentes concentrados en la fase vapor son etanol y acetato de etilo, mientras que el propanol y el metoxipropanol que son los componentes menos volátiles se encuentran en fase líquida.

Partiendo de los parámetros iniciales y de la suposición de un flujo de alimentación de 100 mol, como se mencionó antes, se determinan las fracciones molares en el destilado y fondos por medio del balance de los compuestos seleccionados como el más volátil y el clave, el número de etapas mínimas se calcula por medio de la ecuación de Fenske teniendo en cuenta que al tratarse de un sistema multicomponente la volatilidad relativa se aproxima a un promedio entre las volatilidades calculadas con las temperaturas de burbuja y rocío (Ver tabla 40), se obtuvo un valor de  $N_{min}$  aproximadamente igual a 3 etapas.

**Tabla 40.** Flujos y composiciones de los componentes clave y volátil.

--	Composición
$X_{etanolD}$	39,3009
$X_{acetatoetiloD}$	0,4534
$X_{etanolB}$	26,2006
$X_{acetatoetiloB}$	2,7852
$N_{min}$	2,7711

Una vez conocido el  $N_{\min}$  se determinan las fracciones en el destilado de los otros compuestos haciendo uso de la ecuación de Fenske, posterior a esto se calculan las fracciones en los fondos por balance, los resultados se observan en la tabla 41.

**Tabla 41.** Composiciones en el destilado y los fondos.

Composición	Valor
$X_{\text{propanolD}}$	0,4349
$X_{\text{acetoetiloD}}$	10,3475
$X_{\text{metoxipropanolD}}$	5,2313
$X_{\text{propanolB}}$	2,3293
$X_{\text{acetoetiloB}}$	10,7265
$X_{\text{metoxipropanoB}}$	2,1902

Haciendo uso de la segunda ecuación de Underwood se obtiene un valor de 0,543997427 para  $\phi$  lo cual está indicando la relación entre el flujo de vapor producido y el de alimentación, es decir se está evaporando de la corriente el 54,3% mientras el porcentaje restante es líquido, este parámetro se sustituye en la primera ecuación de Underwood con el fin de obtener el flujo de vapor mínimo con que debe operar la columna, con este parámetro se obtiene el flujo de líquido mínimo y de su relación se realiza el cálculo para la relación de reflujo mínima. La relación de reflujo se calculó haciendo uso de la regla heurística, con la correlación de Gilliland que relaciona la cantidad real de etapas con la cantidad de etapas a reflujo total se establecen las coordenadas X y Y de la columna con el fin de calcular el número de etapas requeridas para la relación de reflujo seleccionada, dando un valor de 9.

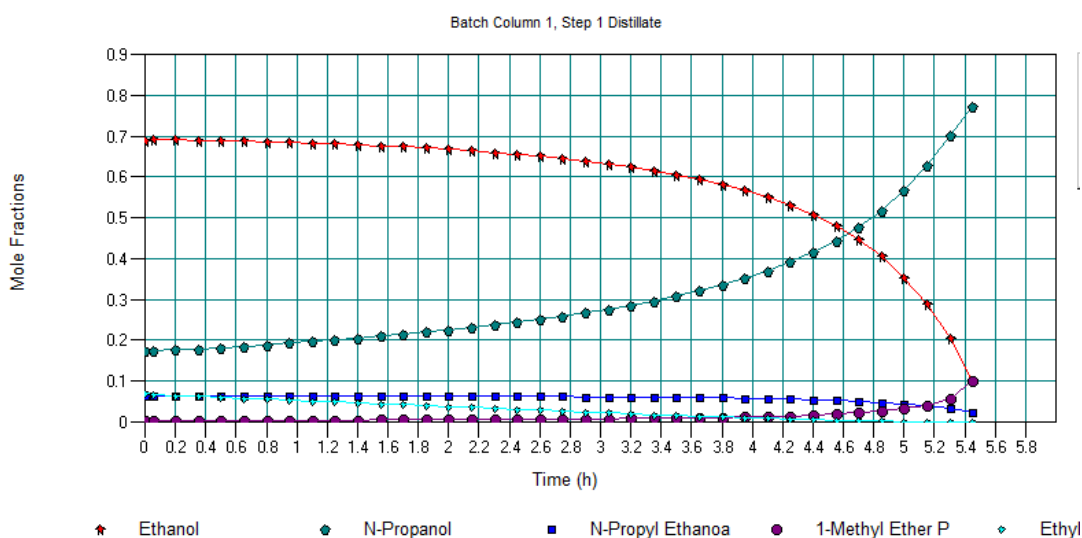
El método corto, fue simulado en el programa CHEMCAD 3.1.6<sup>153</sup>, debido a que, en la bibliografía encontrada<sup>154155</sup>, este es uno del programa más adecuados para este tipo de operación donde se ingresaron las composiciones de la alimentación obtenidas en la cromatografía de gases acoplada a masas del residuo solvente, a condiciones ambientales donde se varió el reflujo y la composición en el destilado para analizar las variaciones respecto a la operación. A continuación, se observa la relación composición tiempo, suponiendo un reflujo de 0,5.

<sup>153</sup> CHEMCAD V6.1.3 [Versión libre]. [programa de computador en disco]. Chemstations. 2008. System requirements: 1,03 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM.

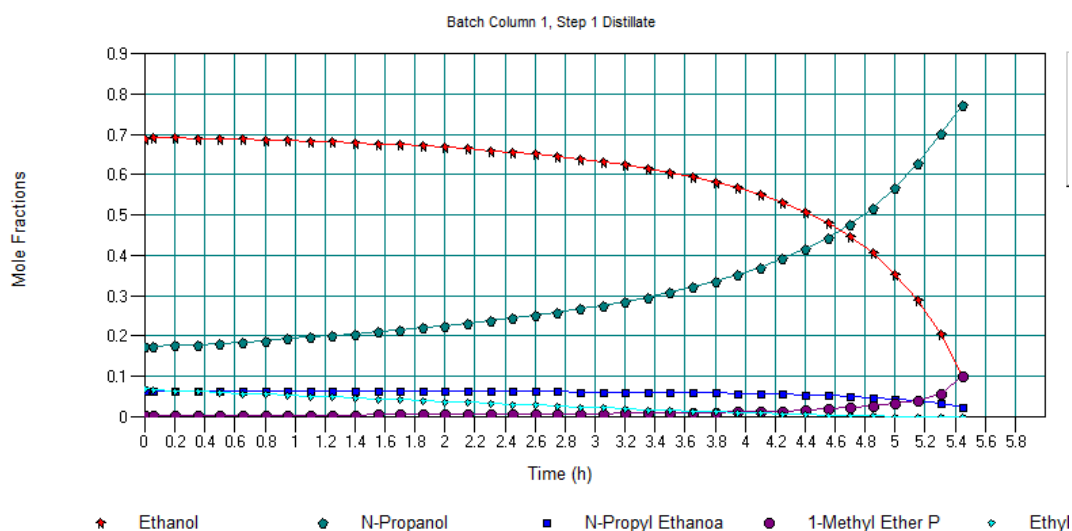
<sup>154</sup> DIWEKAR, Urmila. Batch distillation Simulation, optimal design and control. Batch distillation software programs. 2 ed. Estados Unidos. Taylor & Francis Group. 2012. 335-346 p. ISBN 978-1-4398-6122-6.

<sup>155</sup> DIMIAN, Alexandre C.; BILDEA, Costin S. y KISS, Anton A. Integrated design and simulation of chemical processes. Batch processes. 2 ed. Amsterdam. Elsevier B.V. 2014. 450 p. ISBN 1570-7946.

**Gráfica 12.** Composición destilada vs tiempo. Reflujo 2



**Gráfica 13.** Composición destilada vs tiempo. Reflujo 3



Como se observa en las gráficas 12 y 13, la variación del reflujo no influye en la composición del destilado, esto se puede deber a que como se seleccionaron valores pequeños de reflujo, porque el equipo operara a una etapa, debido a que no se busca separar los componentes puros de la mezcla, sino separar el sólido.

Al comparar los resultados teóricos obtenidos con el simulador contra las composiciones de la prueba de destilación (Ver tabla 41), se observa que los

componentes mayoritarios son el etanol y n-propil acetato, mientras que los minoritarios son n-propanol, metoxi propanol y acetato de etilo, suponiendo que el acetato de etilo queda en fondos. Ahora con respecto a los resultados obtenidos en la cromatografía los componentes mayoritarios son el propanol y etanol, siendo los minoritarios el n-propil acetato, metoxi propanol y acetato de etilo.

#### 4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

El tanque se dimensiona teniendo en cuenta el flujo de alimentación y la densidad del residuo. Teniendo en cuenta que el flujo se determinó a partir del historial de producción de la empresa, es decir, 46,79 kg/d con un exceso del 10% en el caso de que se presente alguna eventualidad en la producción y de esta manera el tanque sea apto para la alimentación.

##### Ecuación 30. Densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{46,79 \text{ kg/d}}{813,93 \text{ kg/m}^3} = 0,06 \text{ m}^3/\text{d}$$

Teniendo en cuenta que el recipiente por seguridad debe de estar lleno máximo al 80%, se tiene entonces un factor de seguridad de 20%.

$$V_{nuevo} = 0,0575 \text{ m}^3 * 1,2 = 0,07 \text{ m}^3$$

El diámetro y altura del tanque se calculó con base a la relación L/D y la geometría del recipiente:

##### Ecuación 31. Relación altura sobre diámetro

$$\frac{H}{D} = 2$$

##### Ecuación 32. Volumen de un cilindro

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

Dónde:

- V: Capacidad (m<sup>3</sup>)
- D: Diámetro del recipiente. (m)
- H: Altura del recipiente (m).



Despejando el diámetro de la ecuación 32, se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,0689 \text{ m}^3 * 2}{\pi}} = 0,3528 = 35 \text{ cm}$$

$$H = 0,3528 \text{ m} * 2 = 0,7056 \text{ m} = 70 \text{ cm}$$

#### 4.3 BALANCE DE ENERGIA

Para determinar la potencia del equipo es importante tener en cuenta las ganancias y perdidas de calor en el sistema, teniendo como punto de partida dos etapas, la primera consiste en el calor requerido para iniciar el proceso, este involucra el calor que se necesario para calentar el equipo, el calor que ha de recibir la mezcla para aumentar su temperatura e iniciar la separación y el calor que se pierde, en la segunda etapa ya se tiene en cuenta el calor latente o energía necesaria para que se de el cambio de fase e igualmente se tiene en cuanta el calor perdido durante esta etapa.

Basado en el principio de lonservación de energía, se establece la ecuación de balance general.

$$E_{entrada} + E_{produce} - E_{consume} = E_{salida} + E_{acumula}$$

Sustituyendo los valores correspondientes, en regimen estacionario, se tiene:

$$0 = [(E_C + E_P + U)_e - (E_C + E_P + U)_s] + [(PV_e - PV_s)] + Q + W$$

Sabiendo que Ec y Ep corresponden al cambio de energía cinética y potencial respectivamente, reemplazando, los respectivos términos y considerando que:

$$H = U + PV$$

Se tiene:

$$\frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) + mg(z_1 - z_2) + (H_2 - H_1) = Q + W$$

Considerando que no hay variaciones de energía potencial, cinética, ni se genera trabajo, se anulan términos y se obtiene:

**Ecuación 33. Balance entálpico**

$(H_2 - H_1) = Q$
-------------------

Considerando que el sistema está a una presión y temperatura definida, para una mezcla:

**Ecuación 34. Entalpia relativa**

$$H = \sum_{i=1} m H_{fi}^{T_{ref}} + \sum_{i=1} m C p_i (T - T_{ref})$$

Donde:

- H: Entalpia relativa.
- m: Masa por componente i por unidad de masa de masa de mezcla
- T: Temperatura.
- $H_{fi}^{T_{ref}}$ : Entalpia de formación del componente ia la temperatura de referencia.
- $C p_i$ : Calor especifico del componente i.

Si en el intervalo de temperatura, llegase a existir un cambio de estado, el segundo término de la ecuación 34:

$$m C p_i (T' - T_{ref} + \lambda_i + C p_i (T - T'))$$

La ecuación 34 se convierte en:

$$Q = \sum_{i=1} m_2 C p_i (T_2 - T_{ref}) - \sum_{i=1} m_1 C p_i (T_1 - T_{ref}) + \sum_{i=1} m_2 H_{fi}^{T_{ref}} - \sum_{i=1} m_1 H_{fi}^{T_{ref}}$$

Dado que en el sistema no ocurre reacción alguna, el termino

$$\sum_{i=1} m_2 C p_i (T_2 - T_{ref}) - \sum_{i=1} m_1 C p_i (T_1 - T_{ref}) = 0$$

Y la ecuación se simplifica a:

**Ecuación 35. Calor**

$$Q = \sum_{i=1} m C p_i (T_2 - T_1)$$

Donde:

- m: Masa por componente i por unidad de masa de masa de mezcla

- T: Temperatura.
- $Cp_i$ : Calor específico del componente i.

Para determinar el calor que se requerirá para llevar a cabo el proceso, suponiendo que se lleva a presión constante, como se mencionó anteriormente, este proceso se divide en cuatro etapas

Primero el calor que debe ser absorbido por el recipiente, para lo cual se debe tener en cuenta el material del equipo que para este caso se seleccionó acero inoxidable AISI 304, por ser el más utilizado en la industria y por ser el más accesible.

**Tabla 42.** Propiedades Acero inoxidable AISI 304

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7.930
Capacidad calorífica (J/kg K)	510

**Fuente:** Goodfellow50. Acero inoxidable – AISI 304. [Citado en abril 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>

Inicialmente partiendo de la ecuación de densidad y teniendo en cuenta las dimensiones del tanque, se determina la masa del tanque y por medio de la ecuación 35 se determina el calor necesario para calentar el equipo:

$$m = 0,06899 \text{ m}^3 * 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 547,06 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{equipo}} = 547,06 \text{ kg} * 510 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} * (350,61 - 288,15) \text{ K} = 1,74 \times 10^7 \text{ J} = 1,21 \text{ kJ/s}$$

La segunda fase, consiste en el calor del residuo o calor sensible, que corresponde al calor absorbido por la mezcla para que esta aumente su temperatura desde la temperatura ambiente hasta el punto de ebullición de la mezcla.

$$Q_{\text{residuo}} = \frac{0,003249 \text{ kg}}{\text{s}} * 8370 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} * (350,61 - 293,15) \text{ K} = 1,56 \text{ kJ/s}$$

La tercera , corresponde al calor latente o la energía necesaria para que la mezcla cambie de fase líquida a vapor, esta definida por la ecuación 36.

**Ecuación 36.** Calor latente de vaporización

$$Q = m\lambda_{\text{vap}}$$

Donde:

- m: Masa por componente i por unidad de masa de masa de mezcla

- $\lambda_{vap}$ : Diferencia entalpia de vaporización

$$Q_{latente} = 0,002785 \frac{kg}{s} * 8,80 \text{ kJ/kg} = 0,02 \text{ kJ/s}$$

Intermedio a estas etapas hay que tener en cuenta el calor perdido asociado con el la etapa inicial y con el cambio de fase.

$$Q_{perdido} = \frac{0,002785 kg}{s} * 8710 \frac{J}{kg K} * (353,15 - 350,61)K = 0,06 \text{ kJ/s}$$

De esta manera el calor total corresponde a la sumatoria de las etapas anteriormente mencionadas:

$$Q = 1,21 \frac{kJ}{s} + 1,56 \frac{kJ}{s} + 1,56 \frac{kJ}{s} + 0,024523 \frac{kJ}{s} + 0,0616 \frac{kJ}{s} = 4,42 \text{ kW}$$

#### 4.4 CONDENSADOR

Partiendo del balance de energía.

$$\begin{aligned} E_{entrada} - E_{salida} &= \Delta E_{sistema} \\ Q_{ent} - Q_{sal} + E_{gen} &= \Delta E_{sistema} \end{aligned}$$

La energía del sistema es cero debido a que no cambia el estado del sistema. Quedando:

#### Ecuación 37. Balance de energía del sistema

$$Q_{entrada} + Q_{salida} + W + m_1 \left( \frac{x_1}{2} + h_1 \right) - m_2 \left( \frac{x_2}{2} + h_2 \right) = 0$$

Para simplificar el análisis del intercambiador, se tiene en cuenta que los cambios en la energía cinética y potencial de entrada y salida son despreciables debido a que las corrientes del fluido experimentan poco o ningún cambio en las velocidades, la conducción axial de calor a lo largo del tubo usualmente es insignificante y no se tiene interacción de trabajo., por lo cual resulta la siguiente expresión:

$$Q_{entrada} + Q_{salida} = 0$$

Con las suposiciones anteriores, la primera ley de la termodinámica requiere que la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido caliente sea igual a la transferencia de calor hacia el frio, así:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m} * Cp * \Delta T = \dot{m} * Cp * \Delta T$$

$$\dot{m}_{vapor} c_{p_{vapor}} (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_{agua} c_{p_{agua}} (T_{c2} - T_{c1})$$

Se asume que el condensador se aísla adecuadamente, de tal manera que la transferencia de calor solo se da entre los dos fluidos (caliente y frío), es decir, una sección diferencial se puede expresar como:

$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_h c_{p_h} dT_h$$

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_c c_{p_c} dT_c$$

Se agrega un signo negativo a la ecuación de la razón de transferencia de calor para el fluido caliente, para que sea un valor positivo, luego se despejó las anteriores expresiones, así:

$$dT_h = -\frac{\delta \dot{Q}}{\dot{m}_h c_{p_h}}$$

$$dT_c = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{m}_c c_{p_c}}$$

Al restar la segunda derivada de la primera, se obtiene:

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -\delta \dot{Q} \left( \frac{1}{\dot{m}_h c_{p_h}} + \frac{1}{\dot{m}_c c_{p_c}} \right)$$

En la sección diferencial, la razón de transferencia de calor, se presenta de la siguiente forma:

$$\delta \dot{Q} = U(T_h - T_c) dA_s$$

Al sustituir ésta, en la ecuación anterior, queda:

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U dA_s \left( \frac{1}{\dot{m}_h c_{p_h}} + \frac{1}{\dot{m}_c c_{p_c}} \right)$$

Luego, se realizó la integración a la anterior expresión, obteniendo:

$$\ln \frac{T_{h,sal} - T_{c,sal}}{T_{h,ent} - T_{c,ent}} = -U A_s \left( \frac{1}{\dot{m}_h c_{p_h}} + \frac{1}{\dot{m}_c c_{p_c}} \right)$$

En la ecuación 38 se muestra la ecuación del balance de energía.

**Ecuación 38.** Balance de energía intercambiador de calor.

$$Q = UA_s \Delta T_{ml}$$

Donde la diferencia de temperatura media logarítmica ( $\Delta T_{ml}$ ), se expresa así:

**Ecuación 39.** Diferencia de temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Inicialmente se tuvo en cuenta un balance por cada etapa para determinar la media térmica logarítmica balanceada. En la etapa de enfriamiento, el flujo de agua se determinó con el siguiente balance:

**Ecuación 40.** Balance etapa de enfriamiento

$$\dot{m}_{vapor} c_{p_{vapor}} (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_{agua} c_{p_{agua}} (T_{c2} - T_{c1})$$

Despejando de la ecuación 40, se tiene;

$$\dot{m}_{agua} = \frac{\dot{m}_{vapor} c_{p_{vapor}} (T_{h1} - T_{h2})}{c_{p_{agua}} (T_{c2} - T_{c1})}$$

Donde:

- $\dot{m}_{vapor}$  : Flujo másico del vapor (kg/s).
- $\dot{m}_{agua}$ : Flujo másico del refrigerante (kg/s).
- $c_{p_{vapor}}$ : Coeficiente de calor calorífica de la mezcla vapor (J/kg\*K), a la temperatura media (351,88 K).
- $c_{p_{agua}}$ : Coeficiente de calor calorífica del agua <sup>156</sup> (J/kg\*K), a la temperatura media (288,15 K).
- $T_{h1}$ : Temperatura de rocío a la entrada del condensador.
- $T_{h2}$ : Temperatura de burbuja a la salida del condensador.
- $T_{c1}$ : Temperatura de entrada del refrigerante
- $T_{c2}$ : Temperatura de salida del refrigerante.

<sup>156</sup>Calor específico del agua. [Citado el 18 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/caloresph2](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/caloresph2).

$$\dot{m}_{agua} = \frac{0,002785417 * 8,71E + 03 * (353,15 - 350,61)}{4186 * (293,15 - 283,15 K)} = 0,0015 \text{ kg/seg}$$

El coeficiente de calor calorífico de la mezcla líquida a  $T_{h1}$ , se determinó a partir de la siguiente expresión<sup>157</sup>:

**Ecuación 41.** Calor específico mezcla.

$$Cp_m = \sum_{i=1}^{NC} X_i * Cp_i$$

$$Cp_m = ((1,54E + 02 * 0,34217) + (2,19E + 02 * 0,10633) + (1,15E + 02 * 0,47973) + (1,84E + 02 * 0,04536) + (2,24E + 02 * 0,02641)) * 59,90014176$$

$$Cp_m = 8,73E + 03 \text{ J/mol K}$$

Para el componente etanol, el coeficiente de calor calorífico, se halló con la ecuación<sup>42</sup>.

**Ecuación 42.** Calor específico componente

$$Cp_{liq} = A + (B * T) + (C * T^2) + (D * T^3)$$

$$Cp_{liq} = 59,342 + (0,3636 * 353,15) + (-1,22E - 03 * 353,15^2) + (1,80E - 06 * 353,15^3)$$

$$Cp_{liq} = 1,15E + 02 \text{ (J/mol K)}$$

La viscosidad de la mezcla vapor a  $T_{h1}$ , se determinó a partir de la siguiente ecuación<sup>158</sup>:

**Ecuación 43.** Viscosidad de la mezcla.

$$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n X_i \ln \mu_i$$

<sup>157</sup> RODRIGUEZ, Jorge. Estimación de propiedades termodinámica. Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. 1999. [Citado el 18 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.modeloingenieria.edu.ar/mei/repositorio/descargas/modelado/cap08.pdf>.

<sup>158</sup> Métodos de Estimación para Viscosidad. [Citado el 18 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://tecno.cruzferro.com/formularios/viscosidad>

$$\ln \mu_m = ((0,34217 * \ln(0,637621986)) + (0,10633 * \ln(0,284271055)) \\ + (0,47973 * \ln(0,43003087)) + (0,04536 * \ln(0,251807678)) \\ + (0,02641 * \ln(0,599274105))) * 0,001$$

$$\ln \mu_m = 0,00046 \text{ Pa.seg}$$

La densidad de la mezcla a  $T_{h1}$ , se determinó a partir de la siguiente expresión<sup>159</sup>:

**Ecuación 44.** Densidad de la mezcla.

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{\rho_i}}$$

$$\rho = \frac{1}{\frac{0,34217}{0,749631994} + \frac{0,10633}{0,820119515} + \frac{0,47973}{0,732356437} + \frac{0,04536}{0,824585037} + \frac{0,02641}{0,863750015}}$$

$$\rho = 753,73 \text{ kg/m}^3$$

La conductividad térmica de la mezcla vapor a  $T_{h1}$ , se halló con la siguiente ecuación<sup>160</sup>:

**Ecuación 45.** Conductividad térmica

$$k_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j k_{ij}$$

<sup>159</sup> RODRIGUEZ, Jorge. Estimación de propiedades termodinámica. Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. 1999. [Citado el 18 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.modeloingenieria.edu.ar/mei/repositorio/descargas/modelado/cap08.pdf>

<sup>160</sup> Métodos de Estimación para conductividad térmica. [Citado 18 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://tecno.cruzferro.com/formularios/conductividad>



$$\begin{aligned}
k_m = & (0,377225063 * 0,352241641 * 0,074067758) \\
& + (0,068283728 * 0,06112043 * 0,377225063) \\
& + (0,078989169 * 0,377225063 * 0,03658163) \\
& + (0,069762986 * 0,377225063 * 0,172831235) \\
& + (0,066679559 * 0,352241641 * 0,06112043) \\
& + (0,076850448 * 0,352241641 * 0,03658163) \\
& + (0,068089412 * 0,352241641 * 0,172831235) \\
& + (0,070641864 * 0,06112043 * 0,03658163) \\
& + (0,063170407 * 0,06112043 * 0,172831235) + (0,07222624 \\
& * 0,03658163 * 0,172831235)
\end{aligned}$$

$$k_m = 0,02 \text{ W/m K}$$

En cuanto al balance de energía para el vapor, se utiliza la siguiente ecuación:

**Ecuación 46.** Balance de energía vapor.

$$\begin{aligned}
& \boxed{q_h = \dot{m}_{vapor} c_{p_{vapor}} (T_{h1} - T_{h2})} \\
q_h = & 0,002785417 * 8,71E + 03 * (353,15 - 350,61) = 61,65W
\end{aligned}$$

Para la media térmica logarítmica, considerando que el intercambiador opere en contracorriente, se utilizó la siguiente ecuación:

$$MLDT = \frac{60 - 67,46}{\ln\left(\frac{60}{67,46}\right)} = 63,66 \text{ K}$$

Para estimar el área a partir de un supuesto de coeficiente global, para el caso se tomó un valor de  $U_D = 350 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  usado para líquidos orgánicos, mediante la ecuación 38:

$$A = \frac{q}{U_D * MLDT} = \frac{61,65330843W}{350 * 63,65716339} = 0,0028 \text{ m}^2$$

Ahora para determinar el factor de corrección ( $F_T$ ), se hallaron los parámetros, mostrados a continuación:

**Ecuación 47.** Factor de corrección  $F_T$

$$\boxed{F_T = \frac{\sqrt{R^2 + 1} * \ln \frac{1-S}{1-RS}}{(R-1) * \ln \frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})}}$$

Donde:

$$R = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{353,15 - 350,61}{293,15 - 283,15} = 0,25$$

$$S = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{293,15 - 283,15}{353,15 - 283,15} = 0,14$$

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2 + 1} * \ln \frac{1 - S}{1 - RS}}{(R - 1) * \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}} = 0,99$$

En cuanto a los tubos, se seleccionó OD (ln) de 1/2" con un diámetro externo de 0,0127m y diámetro interno de 0,0066m del documento Boiler Tube Expanders<sup>161</sup>. Por conveniencia se seleccionó arreglo triangular, para el cual se determinó los el número de tubos<sup>162</sup>:

**Ecuación 48.** Numero de tubos

$$N_t = 0,875 * \left( \frac{CTP}{CL} \right) * \frac{DC^2}{Pt^2}$$

$$N_t = 0,875 * \left( \frac{0,9}{0,87} \right) * \frac{8,875108761^2}{0,04^2} = 8,875108761$$

El número de tubos se estableció, teniendo en cuenta el calibre de los tubos y el cálculo aproximado, al verificar en la tabla<sup>163</sup> se define que el número de tubos es 12.

Donde:

- CTP: Se refiere a la constante que toma en cuenta los espacios entre la coraza, los tubos y los pasos del lado del tubo.
- DC: Diámetro equivalente de la coraza en metros.
- CL: Constante de distribución.

<sup>161</sup> KALMIA. Tube Expanders. [Citado el 19 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.kalmia.net/cat/expanders\\_de\\_tubo/expanders\\_de\\_tubo.pdf](http://www.kalmia.net/cat/expanders_de_tubo/expanders_de_tubo.pdf)

<sup>162</sup> ONTIVEROS, Jesús F. Operaciones unitarias. Dimensionamiento de Equipos de Transferencia de Calor. [Citado el 19 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jesusf/OP2-001Def.pdf>.

<sup>163</sup> THOMAS C. WILSON INC. Boiler tube expanders. [Citado el 19 de marzo de 2017]. [En línea]. Disponible en: [http://www.tcwilson.com/boiler\\_tube\\_expand/reference\\_charts/birmingham\\_tubewall\\_gauge.php](http://www.tcwilson.com/boiler_tube_expand/reference_charts/birmingham_tubewall_gauge.php)

- Pt: Espaciado de los tubos, metros.

También se tuvo en cuenta la distancia imaginaria o claro, hallada de la siguiente manera<sup>164</sup>:

**Ecuación 49.** Distancia imaginaria o claro

$$C = \frac{1,6 + (0,004 * D_{is})}{1000}$$

$$C = \frac{1,6 + (0,004 * 203)}{1000} = 0,002412m$$

En cuanto a la coraza, conociendo que es 2 pasos por el tubo y 1 por la coraza, se determinó el espacio entre deflectores (B) con la quinta parte del diámetro interno de la coraza, dando como resultado 0,0406m. Luego se halló el área de flujo por el lado de la coraza, así:

**Ecuación 50.** Area de flujo intercambiador

$$a_s = \frac{D_s * C * B}{N_{PS} * Pt}$$

$$a_s = \frac{0,203 * 0,002412 * 0,0406}{1 * 0,04} = 0,000496981m^2$$

Mientras que el diámetro equivalente de la coraza para arreglo triangular, se determinó con la siguiente expresión<sup>165</sup>:

**Ecuación 51.** Diámetro equivalente.

$$D_e = \frac{4 * \left( \left( \frac{1}{2} * Pt * 0,86 * Pt \right) - \left( \frac{1}{2} * \pi * (DE)^2 * \frac{1}{4} \right) \right)}{\frac{1}{2} * \pi * (DE)}$$

<sup>164</sup> OSORIO AGUILAR, Rita y GONZÁLEZ FLORES, Rafael. Metodología para el diseño de un intercambiador de calor de tubo de coraza. En: Revista de la Asociación Mexicana de Metodología de la Ciencia y de la Investigación, A.C. Junio, 2010. vol.2, no.1, p.56-75.

<sup>165</sup> ARANDA DELGADO, Carlos Eduardo. Diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza para fluidos líquido –líquido. Perú: Universidad Nacional del Callao; 2014.

$$D_e = \frac{4 * \left( \left( \frac{1}{2} * 1,575 * 0,86 * 1,575 \right) - \left( \frac{1}{2} * \pi * (0,5)^2 * \frac{1}{4} \right) \right)}{\frac{1}{2} * \pi * (0,5)}$$

$$D_e = 4,932499335 \text{ pulg} = 0,125250993m$$

Donde:

- De: Es el diámetro exterior del tubo, pulg.

El área de flujo de los tubos ( $a_t$ ) , se determinó con la ecuación 49.

**Ecuación 52.** Área de flujo de tubos.

$$a_t = \frac{N_t * \frac{\pi}{4} * Di^2}{N_{Pt}}$$

$$a_t = \frac{12 * \frac{\pi}{4} * 0,0066^2}{2} = 0,000205272m^2$$

Además, se determinaron las propiedades a la temperatura media, junto con los siguientes modelos. La velocidad másica de la mezcla, se halló con la siguiente expresión:

**Ecuación 53.** Velocidad másica de la mezcla.

$$G = \frac{m}{a}$$

Donde:

- $m$ : Es el flujo másico del vapor, kg/s.
- $a$ : Área transversal para el lado de la corza,  $m^2$

$$G = \frac{0,002785417}{0,000496981} = 5,604679545 \text{ kg/sm}^2$$

El número de Reynolds ( $Re$ ), para la mezcla, se determina con la ecuación.

**Ecuación 54.** Número de Reynolds

$$Re = \frac{DG}{\mu}$$

Donde:

- D: Diámetro equivalente de la coraza.
- G: velocidad másica de la mezcla.
- $\mu$ : Viscosidad de la mezcla.

$$Re = \frac{0,125250993 * 5,604679545}{0,000472431} = 1485,913301$$

El número de Prandtl (Pr), para la mezcla, se determinó con la siguiente expresión:

**Ecuación 55.** Número de Prandtl.

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{8714,375254 * 8714,375254}{0,024972955} = 164,8560225$$

El número de Nusselt (Nu), para la mezcla, se halló de la siguiente forma.

**Ecuación 56.** Número de Nusselt.

$$Nu = 0,36 * Re^{0,55} * Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,36 * 1485,913301^{0,55} * 164,8560225^{1/3} = 109,6311194$$

Mientras que los coeficientes de convección para la mezcla y el agua, se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 57.** Coeficiente de convección.

$$h = \frac{Nu * \rho}{G}$$

$$h = \frac{109,6311194 * 755,0990214}{5,604679545} = 14770,22019 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

**Ecuación 58.** Coeficiente de convección m.

$$hie = h * \frac{G}{Di}$$

$$h_{ie} = 117,1315397 * \frac{9,701429275}{0,0066} = 172173,2346 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

El coeficiente global limpio ( $U_c$ ). Se calcula con la siguiente ecuación:

**Ecuación 59.** Coeficiente global limpio

$$h_{ie} = h * \frac{G}{DU_c = \frac{h_{ie} * h_h}{h_{ie} + h_h} i}$$

$$U_c = \frac{172173,2346 * 14770,22019}{172173,2346 + 14770,22019} = 13603,23948 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Finalmente, como tanto el  $RD$  calculado como el  $U_d$  son mayores que los propuestos se acepta el diseño térmico.

#### 4.5 CHAQUETA DE CALENTAMIENTO

Partiendo del balance de energía.

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$Q_{ent} - Q_{sal} + E_{gen} = \Delta E_{sistema}$$

La energía del sistema es cero debido a que no cambia el estado del sistema. Quedando:

$$Q \cdot + W \cdot + m_1 \left( \frac{x_1}{2} + h_3 \right) - m_2 \left( \frac{x_2}{2} + h_4 \right) = 0$$

Para simplificar el balance de energía de la chaqueta de calentamiento, se tiene en cuenta que no se tiene interacción de trabajo, no hay cambio en la energía cinética y potencial, quedando de la siguiente manera:

$$Q \cdot + m_3 h_3 - m_4 h_4 = 0$$

Asimismo, se realizó el balance de materia, así:

$$Entra - Sale + Genera = Acumula$$

Para este sistema, se asume que no hay cambios durante el proceso, quedando:

$$Entra = Sale$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}$$

De tal manera que, al despejar el calor, en la ecuación y teniendo en cuenta las anteriores simplificaciones, queda:

$$\dot{Q}_p = \dot{m} * (h_3 - h_4)$$

Se considera que no hay cambio en la energía total del sistema y que esta bien aislada la chaqueta con la fibra de vidrio, entonces de acuerdo a la primera ley de la termodinámica la energía que entra al sistema es igual a la energía que sale , quedando la razón de ganancia de calor de la siguiente manera:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_p$$

$$\dot{Q}_g = F * Cp * (T_2 - T_1)$$

Para el diseño del rehervidor, se seleccionó el aceite serie Mobiltherm 605 (Veáse ficha técnica en el anexo 1), para calentar más rápido el sistema.<sup>166</sup> Los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar este aceite son<sup>167</sup>:

- Su resistencia a la degradación térmica y a la oxidación química.
- Buena eficiencia de transferencia de calor y viscosidades que permiten trabajar tanto a las temperaturas de arranque como de operación.
- Elevada estabilidad térmica.
- Capacidad de brindar una vida en servicio extremadamente larga, evitando la formación de depósitos.
- Calores específicos y conductividades térmicas que proporcionan una rápida disipación del calor.
- Excelentes propiedades térmicas.
- Alto desempeño en instalaciones cerradas.
- Adecuada fluidez a bajas temperaturas.
- Minimiza las necesidades para realizar el mantenimiento.
- Mínimo consumo de energía para su circulación.

Rangos de temperatura de la carga del aceite en sistemas cerrados desde -7°C a 315°C , mientras que en sistemas abiertos la temperatura va desde -7°C hasta

<sup>166</sup>Esso Petrolera Argentina S.R.L. Mobiltherm 605. [Citado el 3 de agosto de 2017]. [En línea]. Disponible en: <http://www.armandoscholles.com.ar/pds/Mobiltherm%20605.pdf>

<sup>167</sup>Cepsa lubricantes S.A. Serie mobiltherm 600. [Citado el 3 de agosto de 2017]. [En línea]. Disponible en: [https://www.cepasa.com/stfls/CepsaCom/Lubricantes/ficheros/ficheros/pdf/ht\\_serie\\_mobiltherm\\_600.pdf](https://www.cepasa.com/stfls/CepsaCom/Lubricantes/ficheros/ficheros/pdf/ht_serie_mobiltherm_600.pdf)

180°C.

El flujo del aceite diatérmico se determinó con la siguiente expresión<sup>168</sup>:

**Ecuación 60.** Flujo de aceite diatérmico

$$M = \frac{(F * Cp) * (T_2 - T_1)}{H_3 - H_4}$$

Donde:

- F: Flujo masico de la mezcla, kg/d.
- Cp: Coeficiente de calor calorífico de la mezcla líquida a temperatura media, J/kg\*K.
- $T_2$ : Temperatura de burbuja de la mezcla líquida, K.
- $T_1$ : Temperatura ambiente, K.
- $H_3$ :Entalpia del aceite diatermico a temperatura 127.46 °C.
- $H_4$ :Entalpia del aceite diatermico a temperatura 62.46 °C.

$$M = \frac{(46.79 * 8.37E + 03) * (350.61 - 293.15)}{224591.4 - 82797} = 158.70 \text{ kg/dia}$$

El calor ganado se determinó con la siguiente expresión:

$$Q_g = F * Cp * (T_2 - T_1)$$

$$Q_g = \frac{46.79 * 8.37E + 03 * (350.61 - 293.15)}{1 * 3600} = 6,250.89W$$

El calor perdido se halló con la siguiente expresión:

$$Q_p = m * (H_3 - H_4)$$

$$Q_p = 158.70 * (224591.4 - 82797) = 6,250.89 W$$

Los resultados del calor denotan que se cumple con el balance de energia. Haciendo uso de la ecuación 39 se determinó la media térmica logarítmica.

$$MLDT = \frac{50 - 42.46}{\ln\left(\frac{50}{42.46}\right)} = 46 \text{ } ^\circ C$$

---

<sup>168</sup> BARDERAS VALIENTE, Antonio. Capítulo VII rehervidores. Ingeniería del calor. [Citado el 10 de abril de 2017]. [En línea]. Disponible en: <https://librosdrvaliente.files.wordpress.com/2015/09/capc3adtulo-7-rehervidores.pdf>



Luego, se realizó un proceso iterativo, en la primera iteración, se halló el área del rehervidor, para lo cual se supuso el coeficiente global de transferencia de calor ( $250 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), con la ecuación del balance de energía definido por la ecuación 38:

$$A = \frac{Q_p}{U * MLDT}$$

$$A = \frac{6,250.89}{250 * 46} = 0,5435 \text{ m}^2$$

Donde:

- $Q_p$ : Calor perdido, W.
- U: Coeficiente global de transferencia de calor,  $\text{W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$ .
- $MLDT$ : La media térmica logarítmica,  $^\circ\text{C}$ .

A partir de los resultados anteriores, se determinó el diámetro interno, con la función Solver, utilizando la siguiente función objetivo:

$$f_{objetivo} = (2 * \pi * r) * (r + 4 * r)$$

$$f_{objetivo} = \left(2 * \pi * \frac{D_{int}}{2}\right) * \left(\frac{D_{int}}{2} + 4 * \frac{D_{int}}{2}\right)$$

Donde:

- R: Es el radio interno del rehervidor, m.
- $D_{int}$ : Es el diametro interno del rehervidor, m.

Para la segunda iteración, se realizan los siguientes cálculos:

El coeficiente de transferencia de calor para el fluido interno (aceite) se calculó con la siguiente expresión<sup>169</sup>:

**Ecuación 61.** coeficiente de transferencia de calor para el fluido interno

$$h_{ic} = \frac{jk}{Dt} (NPr)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

<sup>169</sup> GODOY LEMUS, Pablo Arturo. Evaluación de alternativas para la recuperación de calor en un reactor de surfactante en la industria de agroquímicos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala; 2003.

Donde:

- $h_{ic}$ : Coeficiente convectivo o de película interno,  $\frac{W}{m^2} ^\circ C$ .
- $j$ : Factor  $J^{170}$ .
- $k$ : Conductividad térmica del aceite diatérmico,  $W/m^\circ C$ .
- $D_t$ : Diámetro interno, m.
- $N_{Pr}$ : Número de Prandtl.
- $\mu$ : Viscosidad dinámica a la temperatura calórica,  $kg/m \cdot s$ .
- $\mu_w$ : Viscosidad dinámica a la temperatura de la pared del tubo,  $kg/m \cdot s$ .

$$h_{ic} = \frac{260 * 0,1315889}{0,263073335} (254,2560765)^{\frac{1}{3}} * (1)^{0,14} = 823,89 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ C$$

El número de Prandtl ( $N_{Pr}$ ), se determinó con la ecuación 62.

**Ecuación 62. Número de Prandtl**

$$N_{Pr} = \frac{C_p * \vartheta * \rho}{k}$$

Donde:

- $C_p$ : Coeficiente de calor calorífico del aceite a la temperatura media,  $J/kg^\circ C$ .
- $\vartheta$ : Viscosidad cinemática a la temperatura media,  $\frac{m^2}{s}$ .
- $\rho$ : Densidad del aceite diatérmico a la temperatura media,  $kg/m^3$ .
- $k$ : Conductividad térmica del aceite diatérmico a la temperatura media,  $W/m^\circ C$ .

$$N_{Pr} = \frac{1928 * 0,000020397 * 850,78}{0,1315889} = 254,26$$

Con el anterior coeficiente de transferencia de calor ( $h_{ic}$ ), se determinó el coeficiente de transferencia de calor para el fluido exterior del tubo ( $h_{io}$ ), con la siguiente expresión:

**Ecuación 63. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido exterior del tubo**

$$h_{io} = h_{ic} * \frac{D_i}{D_e}$$

---

<sup>170</sup> KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. Coeficientes de transferencia de calor para chaquetas y serpentines. p. 816.

Donde:

- $h_{ic}$ : Coeficiente convectivo o de película interno,  $\frac{W}{m^2} ^\circ C$ .
- DI: Diámetro interno, m.
- DE: Diámetro externo se tuvo en cuenta un Calibre 11-AISI 304 ,m.

$$h_{io} = 823,8969361 * \frac{0,263073335}{0,269173335} = 805,26 \text{ W/m}^2 ^\circ C.$$

El coeficiente global limpio ( $U_c$ ). Se calculó con la ecuación 60:

**Ecuación 64.** Coeficiente global limpio.

$$U_c = \frac{h_{io} * h_{ic}}{h_{io} + h_{ic}}$$

$$U_c = \frac{805,2258025 * 823,8969361}{805,2258025 + 823,8969361} = 407,23 \text{ W/m}^2 ^\circ C$$

Para el área, se despejo de la ecuación de balance de energía (ecuación 38):

$$A = \frac{Q_p}{U_c * MLDT}$$

$$A = \frac{6,250.89}{407,2271879 * 46} = 0,3328 \text{ m}^2$$

El número de Reynolds ( $Re$ ) , se determinó con la ecuación 54.

$$Re = \frac{D_i * V}{\vartheta} = \frac{0,263073335 * 1,5}{0,000020397} = 19346,47$$

Donde:

- Di: Diámetro interno, m.
- V: Velocidad del aceite diátermico, m/s.
- $\vartheta$  : Viscosidad cinemática a la temperatura media,  $m^2/s$ .

A partir de los resultados anteriores, se volvió a determinar el diámetro interno, con la función Solver, utilizando la siguiente función objetivo:

$$f_{objetivo} = (2 * \pi * r) * (r + 4 * r)$$

$$f_{objetivo} = \left(2 * \pi * \frac{D_{int}}{2}\right) * \left(\frac{D_{int}}{2} + 4 * \frac{D_{int}}{2}\right)$$

Con la misma forma anteriormente mostrada, se repitió el proceso iterativo 14 veces más, hasta que convergió el área, dando como resultado el área del reboiler de 0,20 m<sup>2</sup>. Las dimensiones de la chaqueta se determinaron teniendo en cuenta la geometría de la misma con la siguiente expresión:

**Ecuación 65.** Altura tanque.

$$h = \frac{h_t}{1 + f}$$

Donde:

- $h_t$ : Altura del tanque, m.
- $f$ : Factor de seguridad.

$$h = \frac{0,7056}{1 + 0,10} = 0,64 \text{ m}$$

El número de Reynolds ( $Re$ ), se determinó con la ecuación 54.

$$Re = \frac{0,35962 * 1,50000}{5,30E - 06} = 1,02E + 05$$

Al ser el régimen turbulento, se halla  $f$  con la siguiente ecuación

$$f = (0,79 * \ln(Re) - 1,64)^{-2} = 0,02$$

Mientras que el número de Nusselt ( $Nu$ ), se determinó con la siguiente ecuación:

**Ecuación 66.** Número de Nusselt régimen turbulento

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} * (Re - 1000 * Pr)}{1 + 12,7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} * (Pr^{0,67})^{-1}}$$

Donde:

- $f$ : Expresión dependiendo el régimen.
- $Re$ : Número de Reynolds.
- $Pr$ : Número de Prandtl.

$$Nu = \frac{\frac{0,02}{8} * (1,02E + 05 - 1000 * 14,00)}{1 + 12,7 * \left(\frac{0,02}{8}\right)^{0,5} * (14,00)^{0,67}-1} = 812,49$$

#### 4.6 AISLANTE TANQUE

Se seleccionó como aislante de la chaqueta de calentamiento, la fibra de vidrio para disminuir las perdidas de calor, además de ser un material que se usa frecuentemente para dicho objetivo. Mediante la ecuación 67 se halló la resistencia termica del aislante ( $R_{aislante}$ ):

**Ecuación 67.** Resistencia termica del aislante.

$$R_{aislante} = \frac{x_a}{k_a} + \frac{x_{F.V}}{k_{F.V}} + \frac{x_{ac}}{k_a}$$

Donde:

- $x_a$ : Espesor de la lámina de acero inoxidable AISI-304, m.
- $x_{F.V}$ : Espesor de la fibra de vidrio, m.
- $x_{ac}$ : Espesor de la chaqueta de calentamiento Calibre 15 AISI-304, m
- $k_a$ : Conductividad térmica del acero inoxidable AISI-304, W/m°C.
- $k_{F.V}$ : Conductividad térmica de la fibra de vidrio, W/m°C.

$$R_{aislante} = \frac{0,0068}{15,00} + \frac{0,0254}{0,04} + \frac{0,0037}{15,00} = 0,63570 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

El calor con aislante, se halló con la siguiente ecuación:

**Ecuación 68.** Resistencia termica con aislante

$$R_{aislante} = \frac{x_a}{k_a} + \frac{x_{F.V}}{k_{F.V}} + \frac{x_{ac}}{k_a}$$

### Ecuación 69. Calor con aislante

$$q_{aislante} = \frac{2 * \pi * h * (T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1 * r_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_a} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{k_{F.V}} + \frac{1}{h_2 * r_3}}$$

$$q_{aislante} = \frac{2 * \pi * 0,7056 * (127,46000 - 20,00)}{\frac{1}{289,19 * 0,17981} + \frac{\ln \frac{0,18161}{0,17981}}{15,00} + \frac{\ln \frac{0,20701}{0,18161}}{0,04} + \frac{1}{5,00 * 0,207}}$$

$$q_{aislante} = 111,87 \text{ W/m}$$

El calor sin aislante, se halló con la ecuación 70:

### Ecuación 70. Calor sin aislante

$$q_{sinaislante} = \frac{2 * \pi * h * (T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1 * r_1} + \frac{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{k_a} + \frac{1}{h_2 * r_2}}$$

Donde:

- h: Altura del tanque, m.
- $T_1$ : Temperatura del aceite, °C.
- $T_2$ : Temperatura del medio ambiente, °C.
- $h_1$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aceite,  $W/m^2°C$ .
- $h_2$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire,  $W/m^2°C$ .
- $r_1$ : Radio externo del tanque de destilado, m.
- $r_2$ : Radio externo de la chaqueta de calentamiento, m.
- $r_3$ : Radio externo de la chaqueta de calentamiento y espesor de la fibra de vidrio, m.
- $k_a$ : Conductividad térmica del acero inoxidable AISI-304,  $W/m°C$ .
- $k_{F.V}$ : Conductividad térmica de la fibra de vidrio,  $W/m°C$ .

$$q_{sinaislante} = \frac{2 * \pi * 0,7056 * (127,46 - 20,00)}{\frac{1}{289,195 * 0,17981} + \frac{\ln \frac{0,1816}{0,1798}}{15,00} + \frac{1}{5,00 * 0,1816}}$$

$$q_{sinaislante} = 424,94 \text{ W/m}$$

Para el dimensionamiento del tanque se utilizó la siguiente relación  $h/D = 2$ , teniendo en cuenta la geometría del recipiente:

$$D = \sqrt{\frac{A}{\pi * 1,25}}$$

$$D = \sqrt{\frac{1,509 \times 10^{-3}}{\pi * 1,25}} = 6,20 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Una vez determinado el diámetro se halló la altura con la relación mencionada:

$$h = 2 * 6,20 \times 10^{-3} = 0,01240 \text{ m}$$

$$h_i = \frac{\left( 1,86 * \left( \frac{4 * w * c}{\pi * K * L} \right)^{\frac{1}{3}} * \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \right) * K}{D}$$

Donde:

- w: Flujo másico del aceite diatérmico, lb/h.
- c: Calor específico del fluido<sup>171</sup>, BTU/lb°F.
- K: Conductividad térmica, BTU/h ft °F.
- L: Longitud del rehervidor, ft.
- $\mu$  : Viscosidad a la temperatura calórica<sup>172</sup>, lb/ft h.
- $\mu_w$  : Viscosidad a la temperatura de la pared del tubo, lb/ft h.

$$h_i = \frac{\left( 1,86 * \left( \frac{4 * 350 * 0,5044}{\pi * 0,0729 * 12,416} \right)^{\frac{1}{3}} * \left( \frac{26,800}{25,2950} \right)^{0,14} \right) * 0,0729}{0,15}$$

$$h_i = 454,077 \text{ BTU/h ft}^2\text{°F}$$

Se determina el coeficiente de diseño (Ud), por medio de la siguiente expresión:

<sup>171</sup> Regenerador de disolventes. Manual de instrucciones, uso y mantenimiento. Italia sistema tecnologici.

<sup>172</sup> WRIGHT, Wes. Simple equations to approximate changes to the properties of crude oil with changing temperature. Available from Internet < <http://www.petroskills.com/blog/entry/crude-oil-and-changing-temperature?page=3#.WScJWus1-aG> >.

**Ecuación 71.** Coeficiente de diseño Ud

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{U} + R_d}$$

Donde:

- $R_d$ : Es el factor de ensuciamiento, adimensional.

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{250} + 0.002} = 166,67 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El coeficientes de transferencia de calor para el fluido exterior (hio) ,se halla con la siguiente expresión<sup>173</sup>:

**Ecuación 72.** Coeficiente de transferencia fluido externo.

$$h_{io} = h_i * \frac{D_i}{D_e}$$

$$h_{io} = 200 * \frac{0.15}{6,20 \times 10^{-3}} = 9831,14 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura de pared para los fluidos caliente y frio respectivamente,se determinarán con los siguientes modelos:

**Ecuación 73.** Temperatura de pared fluido caliente.

$$T_{hP} = T_{h2} + F_c * (T_{h1} - T_{h2})$$

**Ecuación 74.** Temperatura de pared fluido frio.

$$T_{cP} = T_{c1} + F_c * (T_{c2} - T_{c1})$$

---

<sup>173</sup> RAMIREZ ARBOLEDA, Lina María. Obtención de oseina, fásfato dicalcico y grasa a partir de hueso de res en la empresa productos alimenticios Don rafa LTDA. Manizales: Universidad Nacional De Colombia; 2003.



Donde:

- Fc: Fracción calórica, adimensional<sup>174</sup>.

$$T_{hP} = 62.46 + 0.48492 * (127.46 - 62.46) = 93,97\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{cP} = 20 + 0.48492 * (77.46 - 20) = 47,86\text{ }^{\circ}\text{C}$$

#### 4.7 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Es fundamental mencionar que se utilizan dos tanques de almacenamiento para fraccionar el destilado, de esta manera poder obtener diferentes composiciones en la mezcla, que sean favorables tanto para las unidades de impresión como en la dilución de tintas de esta operación. Para este sistema, se tendrán 2 tanques de almacenamiento para el solvente recuperado, teniendo en cuenta que la densidad de la mezcla es de 813,93 kg/m<sup>3</sup>, el flujo de alimentación es 27,79 kg/d y con un factor de seguridad del 75%.

Inicialmente se determina el volumen de los tanques con la ecuación 30 y con esto un nuevo volumen, así:

$$V_{nuevo} = 0,03415\text{m}^3 * 1,75 = 0,05976\text{m}^3$$

Con el volumen anterior, se remplazó en la ecuación 32, para hallar el diámetro y teniendo en cuenta la siguiente relación H/D=2, se determinó la altura y el diámetro del tanque.

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,05976\text{ m}^3 * 2}{\pi}} = 0,3363\text{ m} = 0,34\text{ m}$$

$$H = 2 * 0,1951 = 0,3901\text{ m} = 0,40\text{ m}$$

---

<sup>174</sup> GONZÁLEZ, Mahuli A. Intercambiadores de calor. Universidad nacional experimental Francisco de Miranda Available from Internet < <https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/unidad-iv-intercambiadores-de-calor.pdf> >.

#### 4.8 SISTEMA DE TUBERÍA

El sistema consiste en 2 m de tubería de acero inoxidable con un diámetro interno de 1". Inicialmente se tuvo en cuenta, el número de Reynolds descrito en la ecuación 50 junto con los siguientes datos.

**Tabla 43.** Valores de entrada características de la mezcla

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	827,76
Viscosidad (Pa s)	0,00177
Diámetro interno (m)	0,0243

Se determina el numero de reynolds con la ecuación 54:

$$Re = \frac{2 \frac{m}{s} * 0,0243 * 827,76 \frac{kg}{m^3}}{0,00177 Pa * s} = 22728,32$$

$$A_{flujo} = \pi * r^2$$

$$A_{flujo} = \pi * (0,01215 m)^2 = 0,0004638 m^2$$

Debido a que el numero de Reynolds indica que se trata de regimen turbulento, el factor de fricción se determina con la ecuación 75.

**Ecuación 75.** Factor de fricción.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{k}{\frac{D}{3,7}} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

- D, diámetro.
- k, rugosidad relativa.
- Re, numero de Reynolds.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{\frac{4,60 \times 10^{-5} m}{0,0243 m}}{3,7} + \frac{5,74}{22.728,32^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0293063$$

Una vez conocido el coeficiente de fricción se calcular la pérdida de carga en la tubería debida a la fricción mediante la ecuación de Darcy Weisbach:

**Ecuación 76.** Ecuación de Darcy Weisbach.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- f, factor de fricción
- L: longitud de la tubería, m
- D: diámetro de la tubería, m
- v: velocidad del fluido, m/s
- g: aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$$h_f = 0,0293063 \times \frac{2m}{0,0243 m} \times \frac{(2 m/s)^2}{2 * 9,8m/s^2} = 0,49225 m$$

Las perdidas generadas por los accesorios estan dadas por, 4 codos de 90°, 2 valvulas de bola y una Te estandar.

**Tabla 44.** Perdidas por accesorios.

Accesorio	Especificación	Cantidad	Le/D	k
Valvulas	Bola	4	150	600
Codos	90° de 1/2"	5	30	150
Te estandar	1/2"	2	20	40

Ahora las perdidas por carga se definen:

**Ecuación 77.** Perdidas por carga.

$$h_L = f + \frac{v^2}{2g} * \sum k$$

$$h_L = 0,0293063 + \frac{(2 m/s)^2}{2 * 9,8m/s^2} * 790 = 0,18438m$$

Para el control del caudal del fluido, es necesario que el sistema cuente con válvulas, para dicha configuración hay que tener en cuenta las salidas y entradas del fluido. Del visor el fluido sale y se divide en dos salidas, por lo tanto, es necesario utilizar una válvula de 3 vías, adicionalmente el tanque destilador y los 2 tanques de almacenamiento cuentan con una válvula para controlar la salida del residuo sólido en el caso del tanque destilador y del producto para los tanques de almacenamiento. Es importante señalar que los criterios de selección que se tuvieron en cuenta para el tamaño del equipo a escala pequeña fue el flujo de alimentación (46,79 kg/d ) con un exceso del 10%, el área disponible (16 m<sup>2</sup>) en la compañía para la máquina destiladora de solventes y una capacidad de 60 L debido a que la carga no es regular. Adicionalmente, tanto el tanque destilador con los tanques de almacenamiento, cuentan con medidores de nivel o mirillas.

Para la representación del sistema de recuperación de solventes mencionado en este capítulo cuatro se utilizó el programa Autocad<sup>175</sup> para mostrar las dimensiones exactas del equipo, la resistencia eléctrica, accesorios y medidores de nivel para los respectivos tanques. (Ver anexo N)

---

<sup>175</sup> AUTOCAD ARCHITECTURE V2016. [programa de computador en disco]. Autodesk. 2016. System requirements: 2,42 KB, EN DISCO. SYSTEM.

## 5. COSTOS

La planta actualmente no cuenta con un sistema de recuperación de solventes, por lo tanto, se debe tercerizar el proceso de recuperación, el cual genera un costo mensual aproximadamente de 1'497.080, siendo indispensable este capítulo para evaluar el costo de la alternativa planteada en el proyecto.

La necesidad de implementar un sistema de recuperación de solventes nace con el fin de reducir costos asociados, evitar el almacenamiento del residuo solvente en la parte externa de la Empresa y garantizar la calidad del solvente que se recircula a la operación de impresión, para impedir que sustancias nocivas afecten las tintas y causen problemas en este proceso como repise o bloqueo de la bobina en la impresora. Los costos generados en promedio por la recuperación realizada en la empresa FIQ durante los tres últimos años se presentan a continuación:

**Tabla 45.** Historial costos de recuperación de residuo solvente

<b>Año</b>	<b>Valor Neto COP</b>	<b>IVA</b>	<b>Valor Total COP</b>
2016	17'964.956	2'874.393	20'839.341
2015	17'138.160	2'742.106	19'880.265
2014	16'367.742	2'618.839	18'986.581

**Fuente:** Historial de costos por recuperación de residuo solvente en la empresa Industria Química FIQ LTDA. Golden Flex S.A.

Por otra parte con el sistema de recuperación, se podría reducir los gastos por la compra de solventes nuevos (Veáse tabla 45) teniendo en cuenta los kilogramos consumidos mensualmente que intervienen en la operación de impresión, debido a que el recuperado obtenido sería útil para disminuir el uso de estos solventes, de esta manera podría cumplir con funciones como diluir las tintas y suplir el 20% de Solflex EP nuevo que junto con el recuperado son utilizados para el lavado de las unidades de este proceso.

**Tabla 46.** Costo de los solventes nuevos empleados en el proceso de impresión

<b>Solvente</b>	<b>COP/kg</b>	<b>Kg consumidos/mes</b>	<b>Valor (COP/Mensual)</b>
Solflex MP	4.540,00	150	1.357.800,00
Metoxipropanol	5.850,00	190	1.111.500,00
Solflex EP	4.610,00	3005	13.851.762,50
Total	15.000,00	3344	16.321.062,50

De acuerdo al último objetivo de este proyecto, se desarrolla un análisis de costo, inversión y de operación para que la Empresa tome la decisión de implementar o no la recuperación interna.

## 5. 1 COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión o Capex se refieren al capital requerido para la adquisición de equipos e instalaciones en una empresa.

**5.1.1 Especificaciones Equipo.** Para la inversión prevista por la compra e instalación del equipo destilador se solicitaron dos cotizaciones y de acuerdo a esto se determinaron las especificaciones de este equipo, como se puede observar en las tablas 47 y 48:

**Tabla 47.** Especificaciones técnicas destilador D 60 Al. Controlgraf.

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Capacidad máxima de carga (l)	60
Producción(l/h)	12-15
Potencia instalada(kW)	3
Medidas(cm)	110 x 70x 150
Peso (kg)	250
Conexión(V)	220

**Tabla 48.** Especificaciones técnicas destilador IST. 62 ATEX II 2 G

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Capacidad máxima de carga (l)	60
Producción(l/h)	15
Potencia instalada(kW)	3
Medidas(cm)	65 x 95 x 120
Peso (kg)	115
Conexión(V)	220

En la tabla 49, se muestran los costos antes de IVA asociados con la compra del equipo teniendo en cuenta la tasa de cambio de 3245,633 COP/EUR aproximado del 2017. Es importante mencionar que estos costos estimados están sujetos a cambios por las variaciones que se pueden presentar en el mercado en cuanto a tasa del euro, precios e impuestos respecto a la compra y el envío de la máquina destiladora.

**Tabla 49.** Costos asociados a la adquisición del destilador.

--	Costo (COP), Controlgraf.	Costo (COP), IST
Equipo.	29.697.541,95	27.587.880,50
Transporte.	1.379.394,03	-
Instalación.	3.900.000,00	3.500.000,00
Total	34.976.935,98	31.087.880,50

A partir de las dos alternativas disponibles, se seleccionó la maquina destiladora de solventes de la empresa IST, debido a que ofrece una propuesta económica más asequible, servicio técnico en la ciudad de Bogotá, atención personalizada sobre el manejo del equipo y mayor garantía.

De acuerdo a la información dada por las dos empresas, se seleccionó la empresa IST, por ser la que más datos aporta para determinar los costos asociados a la importación del equipo. Teniendo en cuenta que el tipo de cambio actual del dólar con respecto al euro es 1.17480 y el tipo de cambio del dólar es de 3.060.

**Tabla 50.** Costos asociados con la importación del equipo.

--	Valor (USD)	Valor (COP)
FOB	9.985,80	30.556.548
Flete aéreo.	499,29	1.527.827
Seguro aduanero	49,93	152.786
Embalaje	59,00	180.540
Total valor CIF	10.594,02	32.417.701

El valor CIF indica el valor total del costo del equipo incluyendo el seguro y flete por traerlo, costos que asume el vendedor.

**Tabla 51.** Impuestos.

Impuesto	Valor (COP)
Arancel (10%)	3.241.770
IVA (19%)	6.775.300
Bodegaje en zona aduanera	340.000
Agenciamiento aduanero	590.000
Declaración, pre inspección y otros	200.000

De acuerdo a la legislación aduanera existen productos de libre importación, precisamente el equipo es de libre importación, es decir, no tienen ninguna restricción. Tiene como desventaja un arancel del 10%. En total los impuestos a pagar suman 11.227.070.

**5.1.2 Costos operacionales.** Son aquellos costos relacionados con el funcionamiento del proceso como costos fijos y variables. Basado en que el tiempo de operación de la máquina es de 5 horas, el consumo energético del equipo y que el costo de un kilowattio en zona franca para el año 2017 es de \$286/ h, se estimó el costo de energía mensual 128.700 COP.

Aparte de la máquina destiladora de solventes, se va a obtener un residuo sólido, por lo cual, se debe tener en cuenta el costo de la disposición de dicho lodo, para ello, se cotizaron dos tratamientos el de celda e incineración con las Empresas Prosarc S.A., Biológicos y contaminados S.A.S. y Enlaces Ambientales S.A.S., como se muestra en la tabla 52.

**Tabla 52.** Disposición del residuo sólido.

<b>Empresa / Tratamiento</b>	<b>Celda de seguridad (COP)/kg</b>	<b>Incineración (COP)/kg</b>
Prosarc S.A	-	1.299
Biológicos y contaminados S.A.S.	1.400	1.600
Enlaces Ambientales S.A.S	980	1.250

Ahora el transporte de este lodo, no viene incluido en los costos anteriores, por ello, en la empresa Prosarc S.A 265.000 COP/ viaje, independiente del peso, mientras que en Biológicos y contaminados S.A.S cobran 300.000 COP para cargas inferiores a 200 kg y por último en Enlaces Ambientales S.A.S cobran 130.000 COP para cargas inferiores a 500 kg. A partir de lo anterior, se dispuso evacuar el sólido dos veces al año en la empresa por ser éste un residuo peligroso y por facilidad de almacenamiento.

A partir de las tres opciones anteriores y tratamientos se escoge el de celda para el residuo sólido resultante de la máquina destiladora de solventes debido a que ofrece una propuesta más factible, mayor seguridad, asesoría personalizada, no tiene costo el transporte cuando se trata de cargas superiores a 500 kg y mayor garantía. Debido a que el residuo sólido o lodo se puede quedar adherido a las paredes del tanque destilado, se puede facilitar la limpieza usando bolsas que son sugeridas por el proveedor, las cuales tienen un costo de 951.686,91 COP por 50 unidades, en la empresa IST.

Para mantener funcionando adecuadamente el equipo y disminuir fallas, se debe procurar hacer el respectivo mantenimiento al equipo, lo cual se presenta en la tabla 53.



**Tabla 53.** Mantenimiento de la máquina destiladora de solventes.

<b>Inspección</b>	<b>Período</b>
Limpiar el depósito	Después cada ciclo
Controlar la válvula de seguridad.	Cada semana
Controlar el tapón del aceite diatérmico.	Cada mes
Controlar y limpiar el radiador.	Cada mes
Controlar la junta de la tapa- depósito	Cada mes
Sustituir el aceite diatérmico.	Cada 1000 horas

De lo mencionado anteriormente en la tabla 53, es primordial señalar que el único gasto que se tendría acerca del mantenimiento del equipo, es el de la sustitución del aceite diatérmico por un valor de \$100.000, mientras que, respecto a la limpieza del depósito y radiador, se realiza con el mismo solvente recuperado, siendo mínimo el gasto por mantenimiento de la máquina.

**5.1.2.1 Costos de energía.** Este costo fijo es fundamental para estimar el gasto energético que tiene la maquina destiladora de solventes diseñada en el capítulo anterior. Por lo cual, el costo de un kilowattio en zona franca de Bogotá para el año 2017 es de \$286/ kW, siendo el consumo energético es de 44,2 kW / mensual y el costo energético \$12641 en promedio mensual.

**5.1.2.2 Costos operario.** Para los costos de personal, se tuvieron en cuenta involucra los costos asociados con la asignación salarial mensual, estos serían en el caso de que se contratara una persona por fuera de nómina, tales como aportes al sistema de seguridad social, prestaciones sociales y parafiscales, a continuación, se indica en la tabla 54, los costos asociados al personal si trabajara el turno completo.

**Tabla 54.** Costos de personal

<b>Descripción</b>	<b>Asignación (mensual, COP)</b>
Asignación salarial.	761.840
Aporte seguridad social.	198.732
Prestaciones sociales.	175.723
Total.	1.136.295

Sin embargo, se requieren conocer los costos asociados solamente al manejo del equipo, si la empresa toma la decisión de que un operario de planta sea el que se encargue de cargar el residuo solvente y supervisar el recuperado de la máquina destiladora debido a que está realiza la recuperación de forma automática durante el tiempo de operación dos veces por semana y 5 horas al día, por el tiempo que trabaja la máquina diseñada, es decir, mensualmente debe operar 40 horas , los costos asociados con el manejo de la maquina se muestran en la tabla 55.

**Tabla 55.** Costos de personal manejo maquina destiladora.

<b>Descripción</b>	<b>Asignación (mensual, cop)</b>
Asignación salarial.	126.973
Aporte seguridad social.	33.122
Prestaciones sociales.	29.287
Total.	189.383

A continuación, se presenta la situación financiera de inversión y los gastos operacionales para evaluar el tiempo de retorno de capital invertido a la máquina destiladora de solventes escogida, donde los ingresos representan los costos relacionados con la tercerización de la recuperación del residuo solvente y se consideran como tal porque no son un gasto.

**Tabla 56.** Retorno de la inversión incluyendo gastos operacionales.

<b>Año</b>	<b>Ingreso</b>	<b>Inversión</b>	<b>Gastos operacionales</b>	<b>Utilidad</b>
1	7.964.956,00	31.087.880,50	10.966.000,00	- 24.088.924,50
2	17.964.956,00	24.088.924,50	10.966.000,00	- 17.089.968,50
3	17.964.956,00	17.089.968,50	10.966.000,00	- 10.091.012,50
4	17.964.956,00	10.091.012,50	10.966.000,00	- 3.092.056,50
5	17.964.956,00	3.092.056,50	10.966.000,00	3.906.899,50

Se puede observar en la tabla 56 que la inversión se recuperará al quinto año debido a que en los primeros cuatro años por la inversión no habrá aún utilidad para la compañía. Además, a partir del quinto año comienza a ver utilidad equivalente a 7'000.000 COP/ANUAL. Cabe mencionar que los ingresos y los gastos operacionales pueden variar por cambios en la tasa representativa del mercado.

Si la empresa decide adquirir el equipo, mediante financiación con un plazo máximo de 3 años (36 meses). Suponiendo que la entidad bancaria realizaría el desembolso del 100% por un crédito para compra del equipo que cuesta \$31.087.880,50 COP a cancelar, suponiendo que el banco suministro una tasa efectiva anual del 22,42%, con una tasa nominal mensual de 1,70%. Con cuotas mensuales de 1.161.682,82, la amortización del crédito se muestra en la tabla 57.

**Tabla 57.** Amortización crédito

<b>Cuota</b>	<b>Saldo Inicial</b>	<b>Interés Mensual</b>	<b>Valor Cuota</b>	<b>Abono Capital</b>	<b>Saldo Final</b>
0	31.087.880	-	-	-	31.087.880
1	31.087.880	528.500	1.161.686	633.187	30.454.693
2	30.454.693	517.735	1.161.686	643.951	29.810.742
3	29.810.742	506.788	1.161.686	654.898	29.155.844
4	29.155.844	495.655	1.161.686	666.032	28.489.813
5	28.489.813	484.332	1.161.686	677.354	27.812.458
6	27.812.458	472.817	1.161.686	688.869	27.123.589
7	27.123.589	461.106	1.161.686	700.580	26.423.009
8	26.423.009	449.196	1.161.686	712.490	25.710.518
9	25.710.518	437.084	1.161.686	724.603	24.985.916
10	24.985.916	424.765	1.161.686	736.921	24.248.994
11	24.248.994	412.237	1.161.686	749.449	23.499.545
12	23.499.545	399.497	1.161.686	762.190	22.737.356
13	22.737.356	386.539	1.161.686	775.147	21.962.209
14	21.962.209	373.362	1.161.686	788.325	21.173.884
15	21.173.884	359.960	1.161.686	801.726	20.372.157
16	20.372.157	346.330	1.161.686	815.356	19.556.802
17	19.556.802	332.469	1.161.686	829.217	18.727.585
18	18.727.585	318.372	1.161.686	843.314	17.884.271
19	17.884.271	304.036	1.161.686	857.650	17.026.620
20	17.026.620	289.456	1.161.686	872.231	16.154.390
21	16.154.390	274.628	1.161.686	887.059	15.267.331
22	15.267.331	259.547	1.161.686	902.139	14.365.192
23	14.365.192	244.211	1.161.686	917.475	13.447.717
24	13.447.717	228.614	1.161.686	933.073	12.514.644
25	12.514.644	212.751	1.161.686	948.935	11.565.709
26	11.565.709	196.619	1.161.686	965.067	10.600.642
27	10.600.642	180.213	1.161.686	981.473	9.619.168
28	9.619.168	163.528	1.161.686	998.159	8.621.010
29	8.621.010	146.559	1.161.686	1.015.128	7.605.882
30	7.605.882	129.301	1.161.686	1.032.385	6.573.497
31	6.573.497	111.751	1.161.686	1.049.936	5.523.561
32	5.523.561	93.902	1.161.686	1.067.785	4.455.777
33	4.455.777	75.749	1.161.686	1.085.937	3.369.839
34	3.369.839	57.288	1.161.686	1.104.398	2.265.441

**Tabla 54.** (Continuación).

<b>Cuota</b>	<b>Saldo Inicial</b>	<b>Interés Mensual</b>	<b>Valor Cuota</b>	<b>Abono Capital</b>	<b>Saldo Final</b>
35	2.265.441	38.513	1.161.686	1.123.173	1.142.268
36	1.142.268	19.419	1.161.686	1.142.268	0

## 6. CONCLUSIONES

- A partir de una comparación de los diferentes métodos para caracterizar mezclas de alcoholes y éteres, se seleccionó la cromatografía de gases como la técnica analítica más apta para este tipo de residuo porque ofrece alta sensibilidad, detección selectiva y elevada eficiencia en la separación de compuestos orgánicos volátiles, además de ser la técnica más utilizada para caracterizar este tipo de mezclas.
- Se realizó un análisis de las materias primas, del residuo y del solvente recuperado evidenciándose que el solvente Solflex MP no posee las características descritas en su ficha técnica, se encontraron trazas de isobutanol en el solvente recuperado, sustancia que no se involucra en el proceso de impresión, lo que indicaría que la empresa externa encargada de la recuperación está realizando mezclas con residuos provenientes de otras entidades.
- Se realizó el análisis de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas del residuo, identificando los compuestos etanol, 1 propanol, 1 metoxi-2 propanol, acetato de etilo y n propil acetato.
- Se realizaron análisis de gravimetría y humedad al residuo solvente, se determinó que el residuo tiene  $4,7573 \pm 0,7172$  % de sólidos totales, 2,1680 % de humedad y 93,0747% de compuestos orgánicos volátiles, mediante un balance de materia se determinó que dichos compuestos ganan humedad debido a la difusión del aire a las tintas.
- A partir del diagnóstico realizado al proceso de impresión, se encontró que se generan mensualmente 0,0519 kg de residuo líquido, 0,1525 kg de residuo gaseoso, 0,1819 kg de Solflex EP, 0,01155 kg de Solflex MP y 0,01095 kg de metoxipropanol por kilogramo de sustrato impreso. Además de la operación resultan mensualmente 1191,25 kg de residuo líquido, 3733,65 kg de residuo gaseoso que se emite hacia la atmósfera y 217 kg de trapos sintéticos contaminados por la limpieza externa realizada a los rodillos, derrames y limpieza de canales.
- Por medio de una matriz de selección basada en la metodología de Kepner Tregoe, se eligió la destilación como el método de separación más adecuado para realizar la recuperación de la mezcla de solventes resultantes del proceso de impresión, por ser el más favorable de acuerdo a los criterios evaluados y ponderados, con un porcentaje de 20% al igual que la filtración, sin embargo la filtración a comparación de la destilación no presenta buena separación de dicha mezcla, porque es un método basado en diferencias de tamaño más no en la diferencia de volatilidades. Además, se seleccionó la operación por lotes debido a que la cantidad necesaria de alimentación no es regular, la cantidad de

solvente a recuperar mensualmente es pequeña (1191,25 kg), con capacidad para separar mezclas multicomponente de manera eficiente y con costos bajos.

- Se realizó una prueba de destilación basada en la metodología establecida por la NTC 619, se tomaron 9 muestras y se analizaron mediante cromatografías de gases.
- A partir de los resultados de cromatografías de las nueve fracciones de destilado y los requerimientos del proceso de impresión, se optaría por mezclar fracción 8 y 9 para dilución de tintas, mientras que respecto al lavado de las unidades de impresión se prefiere mezclas las fracciones 2 y 3, 2 y 4,2 y 5. Además en el caso de que se seleccionara utilizar las fracciones por separado favorables para esta operación, en relación a la dilución de tintas se utilizarían fracción 2,3 y 9 , mientras que en el lavado se elegiría 2,3 y 4.
- Se realizó una prueba asistida de destilación al vacío, para lo cual se hizo caracterización de compuestos orgánicos volátiles, obteniendo como componentes minoritarios acetato de etilo y metoxipropanol, mientras que como componentes mayoritarios se identificó el propanol, acetato de n propilo y etanol.
- La simulación de destilación batch realizada en el programa CHEMCAD 3.1.6, mostró que la variación del reflujo no influyó en la composición del destilado y un tiempo de cuatro horas permite obtener una composición cercana a 80% propanol y 20% N- propil acetato fundamental para fijar el tiempo de operación del sistema de recuperación diseñado.
- Se evaluó los costos de la alternativa planteada para la recuperación, donde se seleccionó la máquina destiladora IST-62 ATEX II 2 G de la empresa IST porque ofreció una propuesta económica más asequible y con garantía por contar con tecnología antiexplosiva de segunda generación.
- Se realizó una comparación de costos para la disposición de los residuos, la empresa Enlaces Ambientales S.A.S es la que ofrece una mejor oferta económica, factible, con mayor seguridad y asesoría personalizada. Además, la empresa decidió cambiar de proveedor para el manejo de los trapos contaminados que se utilizaban para la limpieza externa de rodillos, derrames y limpieza de canales, la empresa se encargará de realizarle tratamiento por celda de seguridad el ente Enlaces Ambientales S.A.S, porque ofreció más bajos costos y mayores garantías que PROSARC S.A. ESP, lo cual generó un impacto adicional a lo estipulado en el proyecto.
- A partir de los costos operacionales relacionados, se puede afirmar que la inversión del equipo de destilación, se recuperará al quinto año porque en los primeros cuatro años no habrá utilidad.

## 7. RECOMENDACIONES

- Estudiar el flujo gaseoso en el proceso de impresión, porque dada la naturaleza de algunos solventes y a que las impresoras flexográficas se encuentran situadas en un área abierta, estos tienden a evaporarse con facilidad.
- Caracterizar el sólido presente en el residuo solvente para analizar a profundidad su naturaleza e identificar distintas disposiciones que se le puedan dar de tal manera que su manejo sea más sostenible con el medio ambiente, para recircular el sólido o realizar una mejor disposición.
- Realizar el diagrama de tubería e instrumentación del método de separación seleccionado para poder establecer un estudio completo de operabilidad y riesgos.
- Evaluar la automatización del equipo de destilación de solvente diseñado, lo cual puede reducir el tamaño e incrementar costos.
- Probar a escala piloto la alternativa seleccionada para probar si efectivamente se cumple con lo esperado.
- Realizar la simulación de destilación batch en otros programas como Aspen Batch distillation y MultiBatchDS utilizando un método riguroso para analizar las variaciones de composición de los componentes que integran el residuo solvente líquido cuando se modifica el reflujo y la composición en el destilado.
- Desarrollar un análisis financiero que comprenda tasas, tendencias, indicadores y estados financieros respecto a la propuesta de recuperación diseñada en el proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

Alcoholes. Guía de productos químicos. [En línea]. Disponible en: <http://guiadeproduktosquimicos.blogspot.com.co/search/label/ALCOHOLES>

ALZATE FONTALVO, Javier y GÓMEZ GARCÍA, Miguel Ángel. Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en Matlab. Modelamiento y simulación de columnas de destilación continuas en estado estable según los modelos de no equilibrio. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2008.

ALZATE FONTALVO, Javier y GÓMEZ GARCÍA, Miguel Ángel. Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en Matlab. Operaciones de separación con múltiples etapas. Bogotá D.C. : Unibiblos, 2008.

AMÉZQUITA RODRÍGUEZ, Wilmer Alejandro y AGUILAR, Rafael. Definición De Un Sistema De Recuperación y Reutilización De Los Residuos Solventes Dentro De La Empresa Sika Colombia S.A. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2008.

ANDIGRAF. Industria editorial y de la comunicación gráfica. [En línea] Disponible en:

[http://www.andigraf.com.co/files/informe\\_economico/2015/informe\\_de\\_sostenibilidad\\_2013\\_industria\\_editorial\\_y\\_de\\_la\\_comunicacion\\_grafica.pdf](http://www.andigraf.com.co/files/informe_economico/2015/informe_de_sostenibilidad_2013_industria_editorial_y_de_la_comunicacion_grafica.pdf).

ARAGONÉS BOUSO. , Juan Luis. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Informe técnico. [En línea] Disponible en: <http://studylib.es/doc/4775588/aplicaciones-y-funcionamiento-pr%C3%A1ctico-de-los-hidrociclones>.

ARANDA DELGADO, Carlos Eduardo. Diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza para fluidos líquido –líquido. Perú: Universidad Nacional del Callao; 2014.

ARNDT MEHLHORN, José Nougués y PUIGJANER, Luis. Using rate based approach under consideration of different contacting regimes for multicomponent batch distillation simulation. En: Elsevier Science Ltd.1998.vol.22. p. 98. S645-S648.

ASGHARZADEH, H; FIROOZABADI, B y AFSHIN, H. Experimental investigation of effects of baffle configurations on the performance of a secondary sedimentation tank. En: Scientia Iranica B. Junio, 2011. vol.4, no.18, p.938-949.

ASPEN HYSYS V8.6. [programa de computador en disco]. Aspen technology. 2015.System requirements: 2,22 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM.



AUTOCAD ARCHITECTURE V2016. [programa de computador en disco]. Autodesk. 2016. System requirements: 2,42 KB, EN DISCO. SYSTEM.

BARDERAS VALIENTE, Antonio. Capítulo VII rehervidores. Ingeniería del calor. [En línea] Disponible en: <https://librosdrvaliente.files.wordpress.com/2015/09/capc3adtulo-7-rehervidores.pdf>.

BERDEAUX, O; MÁRQUEZ RUIZ, Gloria y DOBARGANES GARCÍA, María Carmen. Characterization, quantitation and evolution of monoepoxy compounds formed in model systems of fatty acid methyl esters and monoacid triglycerides heated at high temperatura. En: Grasas y aceites .1999. vol. 50. no. 1; p. 53-59.

Calor específico del agua. [En línea] Disponible en: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/caloresph2](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/caloresph2).

CAMPOS FERNÁNDEZ, Javier. Análisis del comportamiento de mezclas de alcoholes superiores con gasóleo en motores DIÉSEL. Córdoba: Universidad de Córdoba. [En línea] Disponible en: <http://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13268/2016000001371.pdf?sequence=1>

CARAVACA GOMÉZ, Ana María; VERARDO, Vito y CABONI FIORENZA, María. Chromatographic techniques for the determination of alkyl-phenols, tocopherols and other minor polar compounds in raw and roasted cold pressed cashew nut oils. En: Elsevier. 2010.vol. 1217, no. 47; p. 7411-7417.

CARLSON, Eric C. Don't gamble with physical properties for simulations. Chemical Engineering Progress. 1996. p 36-46

Caracterización de mezclas líquidas de solventes y estudio de investigación de una tecnología para la recuperación de solventes. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/483/1/961.pdf>

CARRION, Martha Iris, CENTENO, Marcela y FUENTES, Elvira. Evaluación de la calidad del aire en áreas de prácticas de laboratorio y conocimientos de actitudes y practicas adecuadas de desecho de residuos. Nicaragua : Universidad Nacional Autónoma, 2011.

CERVANTES CONTRERAS, Mario y PEDROZA RODRÍGUEZ, Aura Marina. El pulque: características microbiológicas y contenido alcohólico mediante espectroscopia Raman. En: Nova.Mayo, 2007. vol. 5. no. 8; p. 135-146.

CHEMCAD V6.1.3 [programa de computador en disco]. Chemstations. 2008. System requirements: 1,03 KB, 4,00 KB EN DISCO. SYSTEM.

CHEN, Ming-Luan, et al. Preparation and characterization of methacrylate-based monolith for capillary hydrophilic interaction chromatography. En: Elsevier. Marzo, 2012. vol. 1230; p. 54-60.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. Industrial solvents handbook. Rockville, Maryland USA : Marcel Dekker Inc, 2003.p 100-103, 170-171. ISBN 0-8247-4033-5.

Coalescencia. Filtros coalescedores. [En línea]. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_06.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_06.pdf).

COLORBAR S.A. Las tintas de impresión . [En línea]. Disponible en: <http://impregon.com/pdf/tintas.pdf>.

COLORBAR S.A. Tintas de impresión flexografica. [En línea]. Disponible en: <http://impregon.com/pdf/tintas.pdf>.

COMEX. Coloración de plásticos. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/03/coloracion-de-plasticos.html> .

Comisión Nacional del Medio Ambiente Santiago. 1999. Guía para el control y la prevención contaminación industrial. Manejo de Solventes. [En línea]. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-26264\\_pdf\\_manejo\\_solventes.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-26264_pdf_manejo_solventes.pdf).

CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. 2008. Ley 1252 (27, 11, 2008). Por el cual se (reglamenta Normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones). Bogotá D.C : El Congreso de Colombia.

Consejería de sanidad de Murcia. Dirección General de Salud Pública. Riesgo químico - butanona. [En línea]. Disponible en: <https://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/114696-butanona.pdf>.

CORTEZ, Jazmín. et al. Optimal desing of distillation systems with less tan N-1 columns for a class of four component mixtures. . s.l. : Elsevier. , 2012.

COSMOS S.A. Generalidades de las Tintas Flexograficas. [En línea]. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/tintas-flexograficas-cj1d.html>.

DIMIAN, Alexandre C.; BILDEA, Costin S. y KISS, Anton A. Integrated design and simulation of chemical processes. Batch processes. 2 ed. Amsterdam. Elsevier B.V 2014. p. 450. ISBN 1570-7946.

Diseño y Comunicación gráfica. Papeles y sustratos editorial y de la comunicación gráfica. . [En línea]. Disponible en: <https://hdiseno-igab20121.wikispaces.com/file/view/papeles+y+sustratos.pdf/336812198/papeles+y+sustratos.pdf>.

Distribuidora Química Mexicana S.A de C.V . Ficha técnica cetato de isopropilo. [En línea]. Disponible en: <https://www.diquimex.mx/index.php>.

Distribuidora Química Mexicana S.A de C.V. Ficha técnica metil isobutil cetona. [En línea]. Disponible en: <http://www.diquimex.mx/index.php/productos/item/54-metil-isobutil-cetona/54-metil-isobutil-cetona>.

DIRSCHERL, Jurgen. Chemistry vacuum pumps and pumping units with ATEX conformity. En: Laboratory equipment. Octubre, 2004. p. 1-3.

DIWEKAR, Urmila. Batch distillation Simulation, optimal design and control. Batch distillation software programs.2 ed. USA. Taylor & Francis Group. 2012. p. 335-346 ISBN 978-1-4398-6122-6.

ETIGRAF S.A. Elementos que intervienen en el proceso flexográfico. [En línea]. Disponible en: <http://www.etigraf.com.co/es/component/content/article?id=135-elementos-que-intervien-en-en-el-proceso-flexografico>.

FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Elementary principles of chemical processes.3 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons ,Inc.2005.p. 563. ISBN 0-471-68757-X.

GARCÍA , J Croma. Tintas de impresión. [En línea]. Disponible en: <http://www.cromaiberica.com/46-tintas-base-solvente-para-serigrafia>.

GODOY LEMUS, Pablo Arturo. Evaluación de alternativas para la recuperación de calor en un reactor de surfactante en la industria de agroquímicos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala; 2003

GONZÁLEZ BRAMBILA, Margarita M. Introducción a la ingeniería de procesos. México D.F : Limusa, 2013. p. 186-245.

GONZÁLEZ, Mahuli A. Intercambiadores de calor. Universidad nacional experimental Francisco de Miranda [En línea]. Disponible en: <https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/unidad-iv-intercambiadores-de-calor.pdf>

GOODFELLOW. Acero inoxidable – AISI 304. [En línea]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>.

GUERRERO, Julio Iván. Director técnico comercial tintas. Industrias Lember S.A. [entrev.] Maria Alejandra Tamayo León y Lizeth Catherine Arias Arias. Marzo de 2017.

GUIHUA, Zhu, et al. Flow simulation and analysis in a vertical flow sedimentation tank. . s.l. : Procedia, 2012.p. 197-202.

GUO, Shuaie-jie, et al. Settlement prediction model of slurry suspension based on sedimentation rate attenuation.En: Water Science and Engineering.Enero 2012.vol.1.No.5,p.79-92.ISSN 1674-2370.

GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Análisis económico de procesos. España : Reverté S.A, 2003. p. 22-25.

HENLEY, E. J. y SEADER, J. D. 1990. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química. Barcelona : Reverté S.A., 1990.

HIMMELBLAU, D. Principios básicos y cálculos en ingeniería química. Balances de energía. 6 ed. New York: Bernard Goodwin, 1998, p. 420.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Pinturas, barnices y materias primas. Muestreo. NTC 1052. Bogotá D.C. : El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Etiquetas ambientales tipo I. Sello ambiental colombiano (SAC). Criterios ambientales para tintas para impresión. NTC 6039. Bogotá D.C.: El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Grasas y aceites vegetal y animales, determinación del contenido de agua método de karl Fischer. NTC 4659. Bogotá D.C : El Instituto, 1999.

\_\_\_\_\_. Método de ensayo para el intervalo de destilación de líquidos orgánicos volátiles. NTC 619. Bogotá D.C : El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Muestreo de residuos y suelos para análisis de constituyentes orgánicos volátiles. NTC 4711. Bogotá D.C. : El Instituto,2005.

\_\_\_\_\_. Pinturas y barnices. Términos y definiciones. NTC 5812. Bogotá D.C : El Instituto, 2010.

\_\_\_\_\_. Procedimientos de muestreos para inspección por atributos. NTC-ISO 2859-1. Bogotá D.C : El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Procedimientos de muestreos para inspección por variables. NTC-ISO 3951-1 . Bogotá D.C : El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá D.C.: El Instituto, 1988.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de información electrónica. NTC 4490. Bogotá D.C.: El Instituto, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional del 1-Metoxipropanol. España : s.n., 2009.

IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. Alcohols. [En línea]. Disponible en: <https://goldbook.iupac.org/html/A/A00204.html>.

JIMÉNEZ MENDOZA, Fredys; LLINÁS CEPEDA, Luís Carlos y MARTELO SÁNCHEZ, Luz Elena. Desarrollo de un simulador para el análisis de un sistema de bombeo usando bombas centrífugas en procesos químicos. En: Procesos industriales. Noviembre, 2011, no.118. p. 1-22.

JUÁREZ, José R. et al. Chemical composition, antibacterial activity of essential oil Citrus sinensis L. (Sweet orange) and formulation of a pharmaceutical form. En: Ciencia e investigación. 2010. vol. 13. no. 1; p. 9-13.

KALMIA. Tube Expandes.. [En línea]. Disponible en: [http://www.kalmia.net/cat/expanders\\_de\\_tubo/expanders\\_de\\_tubo.pdf](http://www.kalmia.net/cat/expanders_de_tubo/expanders_de_tubo.pdf)

KEPNERr, Charles y TREGOE, Benjamin. El nuevo directorio racional. Análisis de decisiones. México D.F. : McGraw Hill, 1986. p. 94-110.

KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. Coeficientes de transferencia de calor para chaquetas y serpentines. 2009, p. 816

KOROVESSI, Ekaterini y LINNINGER, Andreas. Batch processes. New York : Taylor y Francis group, 2006. p. 107-126.

KUN-KIM, Jeung y PYO-JU, Dong. Shortcut procedure for multicomponent batch distillation with distillate receiver. England : Ind Eng Chem Res, 1999. p. 1024-1031.

LEMBER S.A. Certificado de análisis de calidad. Segunda Edición. Cali, 2004.

LINDROTH, Mikael. Thesis in Environmental Management. En: Industriellt Miljöskydd. Noviembre, 1999. ISSN 1402-7615.

LIU, Zheji y HILL, D.Lee. Centrifugal compressor noise reduction by using helmholtz resonator arrays. s.l. : Dresser-Rand, 2005. p. 1-18.

LOMBIRA, J. y OTINIANO, M. Antecedentes y perspectivas de la operación de destilación discontinua. En: Per. Quim.Ing. 1998.vol. 1. no. 1.p. 53-65.

LÓPEZ, Germán. Director de producción. Proceso productivo de la planta. [entrev.] Maria Alejandra Tamayo León y Lizeth Catherine Arias. Marzo de 2017.

LÓPEZ, Juan. Estandarización de la técnica de cromatografía de gases, acoplada a espectrometría de masas para la identificación y cuantificación de metilésteres de ácidos. Pereira : Universidad tecnológica de Pereira. Escuela de química., 2008.

MANDAL, B.M. Thermodynamic characterization of binary polymer blends by inverse gas chromatography. En: Journal of Macromolecular Science. 1989. vol. 26. no. 1; p. 175-212.

MANSUR, Herman; OREFICE, Rodrigo L. y MANSUR, Alexandra A.P. Characterization of poly(vinyl alcohol)/poly(ethylene glycol) hydrogels and PVA-derived hybrids by small-angle X-ray scattering and FTIR spectroscopy. En: Elsevier. Septiembre, 2004.vol. 45, no. 21; p. 7193-7202.

Manual técnico de aplicación de tintas. Parte II. [en línea]. Disponible en: [http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual\\_tecnico\\_de\\_aplicacion parte2.pdf](http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual_tecnico_de_aplicacion parte2.pdf).

MARCO, Esther y GRIMALT, Joan O. A rapid method for the chromatographic analysis of volatile organic compounds in exhaled breath of tobacco cigarette and electronic cigarette smokers. En: Elsevier. Septiembre, 2015. vol. 1410. p. 51-59.

MARTÍNEZ et al. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fichas Temáticas Tomo II. [En línea]. Disponible en: [http://web.idrc.ca/es/ev-95613-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://web.idrc.ca/es/ev-95613-201-1-DO_TOPIC.html)

MARTINEZ DE LA CUESTA, Pedro y RUS MARTINEZ, Elois. Operaciones de separación en ingeniería química. Métodos de cálculo. España : Pearson Prentice Hall, 2004.

MATER PRIM S.R.L. Ficha técnica isopropanol . [En línea]. Disponible en: <http://www.materprim.com.py/>.

MCCABE, Warren L. y SMITH, Julian C. y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. Séptima edición . México D.F : McGraw- Hill, 2007. p. 511-513 .

Métodos de Estimación para conductividad térmica . [En línea]. Disponible en: <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/conductividad>.

Métodos de Estimación para Viscosidad. [En línea]. Disponible en: <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/viscosidad>.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 (30, 12, 2005). Por el cual se (Reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral). Bogotá D.C : El Ministerio, 2005.

MINISTERIO DE SALUD. Resolución 2309 (14, 02, 1986). Por el cual se (reglamenta el manejo de residuos sólidos y especiales). Bogotá D.C : El Ministerio, 1986.

MOLINA Buendía P., Lorenzo Gómez A., Velasco López M. (1991). Prácticas de química orgánica. Universidad de Murcia

MONCADA ALBITRES, Luis. Diseño de plantas de procesos químicos. Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo.2010.

\_\_\_\_\_. Diseño de plantas químicas. Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo.

MONTOYA, Sergio y PÁEZ, Carlos. Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos. Programa de tecnología química. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/a32f/39e60c04e452986218331610c3b58d5f9949.pdf>.

MORRISON, Robert Thornton y BOYD , Robert Neylso. Química orgánica. Quinta edición. 1998. Quinta. Boston : Allyn and Bacon, 1998. p. 686-688, 763, 897, 1092.

MURPHY, R, M. Introducción a los procesos químicos. Principios análisis y síntesis. . México : McGraw-Hill, 2007. p. 370-446

NARVÁEZ, A. ZAVALA, J. ROCHA, A y RUBIO, C. Método corto para la destilación discontinua multicomponente considerando una política de reflujo variable. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 12, 2012, p. 621-622.

Nitro química. Manual técnico de aplicación de tintas. Parte II . [En línea]. Disponible en: [http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual\\_tecnico\\_de\\_aplicacion-parte2.pdf](http://www.salazarsa.com/NITROCELULOSA-manual_tecnico_de_aplicacion-parte2.pdf).

Nova report. Edición 1. . Los solventes en la impresión flexográfica. [En línea]. Disponible en: <http://novaflex.com.co/wp-content/uploads/2016/09/Novareport-206.pdf>.

OJEDA, Mariano. 2017. Tecnología de los plásticos. Tratamiento corona. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2012/05/tratamiento-corona.html>.

ONTIVEROS, Jesús F. Operaciones unitarias. Dimensionamiento de Equipos de Transferencia de Calor. [En línea]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jesusf/OP2-001Def.pdf>.

OSORIO AGUILAR, Rita y GONZÁLEZ FLORES, Rafael. Metodología para el diseño de un intercambiador de calor de tubo de coraza, Asociación Mexicana de metodología de la ciencia y de la investigación, A.C, p. 56-75.

OSPINA MACHADO, Julio Ernesto. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Contenido de humedad de equilibrio. Bogotá D.C.: Publisher, 2001. p. 38. ISBN 958-70-1182-1.

OTHMER, Kirk. Enciclopedia de tecnología química. México D.F. : Limusa S.A., 2001. p. 1-7, 279-282 , 523-526, 663-668, 1279-1282.

PEREYRA, Andrea y GIUDICE, Carlos. 2009. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional, 2009.

PERRY, Robert H; GREEN, Don W. y MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico. Destilación. 7 ed. Madrid: McGraw-Hill, 2001. p 13-90. ISBN 84-481-3343-9.

Plásticos Correa S.A.S. . Empaques flexibles. Procesos empresariales. [En línea]. Disponible en: <http://www.plasticoscorrea.com/es/procesos-empresariales>.

PORTALGRAF. Tintas Offset. [En línea]. Disponible en: <https://www.portalgraf.com/impresion/la-tinta-offset>.

PRAUSNITZ, John M. y LICHTENTHALER, Rüdiger N. Termodinámica molecular de los equilibrios de fases. Madrid : Prentice Hall, 2000.p. 210-213

PROSARC S.A. ESP. Certificado tratamiento térmico. Resolución 058 (01, 01, 2002). Licencia ambiental. Resolución 3077 (01, 11, 2006). Bogotá D.C. : s.n., 2016.

PUBCHEM. Chemistry database. National center for biotechnology information. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>.

QUIJANO, Clara E.; CEBALLOS, Liena y PINO, Jorge A. V. análisis de compuestos volátiles en dos especies de theobroma mediante hs-spme. En: Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria. 2001. La Habana, Cuba.

RAMIREZ ARBOLEDA, Lina María. Obtención de oseína, fosfato dicalcico y grasa a partir de hueso de res en la empresa productos alimenticios Don rafa LTDA. Manizales: Universidad Nacional De Colombia; 2003.



RAMIREZ LLAMAS, Laura Alicia; AZUARA, Araceli Jacoby y MARTÍNEZ ROSALES, J. Merced. Adsorción del naranja de metilo en solución acuosa sobre hidróxidos dobles laminares. En: Scielo. Junio, 2015. vol. 25. no. 3; p. 25-34.

Resinas acrílicas. [En línea]. Disponible en: <http://www.aguiaquimica.com/es/productos-categorias/14/hidrosolubles..>

RIANO, Néstor. Fundamentos de química analítica básica. Análisis cuantitativo. Segunda. Manizales : Universidad de Caldas, 2007. p. 19-20.

RICHARDSON, J., F. Particle technology and separation processes. Quinta. Oxford : Elsevier Ltd, 2002. p. 592-599.

RINALDO, Paul. Guía internacional del radioaficionado. Ed. Marcombo S.A. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=frr2fA0T3ssC&pg=PA49&dq=unidad+voltios+sobre+amperios&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwje0YOUiYrUAhXKKyYKHfPEAlwQ6AEIjAA#v=onepage&q=unidad%20voltios%20sobre%20amperios&f=false> >

Rippen. Tolueno. [En línea]. Disponible en: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/-ENV/envsp/Vol345.htm>.

RIVERA, Judith y PÉREZ, Melina. Empleo del sistema potenciométrico Karl Fisher en el desarrollo y la certificación de materiales de referencia (MR). En: Simposio de Metrología. Octubre, 2006, no. 1; p. 1-5.

RODRIGUEZ, Jorge. Estimación de propiedades termodinámica. Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. [En línea]. Disponible en: <http://www.modeloingenieria.edu.ar/mei/repositorio/descargas/modelado/cap08.pdf>.

SCHREIBER, Marc y WITS, Wessel y TE RIELE, Gert Jan. Numerical and experimental investigation of a counter current two phase thermosyphon with cascading pools. En: Applied thermal engineering. . 2016. p. 133-146.

SEADER, J.D y HENLEY, Ernest J. & ROPER, D. Separation process principles. United States : John Wiley & Son, 2011. p. 621-640.

SHARAPIN, Nikolai. Fundamentos de tecnología de productos fitoterapéuticos. Colombia: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2000. p. 25. ISBN: 958-698-001-4.

SILVA CABRA, Brayan Alberto y PARRA GALINDO, Juan Diego. Identificación cualitativa de 2-Propanol empleando ensayos analíticos del laboratorio de química orgánica. En: Química orgánica. 2013. p. 1-7.

SINNOTT, R y TOWLER, G. Diseño en ingeniería química. Kidlington, Oxford : Elsevier Limited of the Boulevard, 2012. p. 292-327, 474-498.

SMITH, J. y VAN NESS, H. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 5 ed. Mexico D.F.: McGraw Hill, 1997. p. 498-505.

SMALLWOOD, Ian M., Ian M. Solvent Recovery Handbook. Second edition. Oxford : Blackwell Science, 2002. p. 83-84.

SORENSEN, Eva. Distillation fundamentals and principles. Design and operation of batch distillation. London : Elsevier Inc, 2014. p. 187-221.

STEWART, Maurice y ARNOLD, Ken. 2008. Gas-Liquid and Liquid-Liquid separators. Oxford : Elsevier Inc, 2008.

SUCROAL S.A. .. Solventes flexo-pinturas. [En línea]. Disponible en: <https://sucroal.com.co/productos/>.

SUCROAL S.A. Solventes flexo-pinturas. [En línea] Disponible en: <http://sucroal.com.co/products/propyflex/>.

Tecnográficos y asesores LTDA. Flexografía . [En línea] Disponible en: <http://tecnograficos.net/flexo.html>.

TOMÁS DO COUTO, Ricardo Miguel. Development of integrated separation processes with green solvents. Diciembre, 2012. p. 47.

TOXNET [Base de datos en línea]. Toxicology data network. U.S. [En línea]. Disponible en: <https://toxnet.nlm.nih.gov>.

Transformaciones Químico Industriales S.L. Nitrocelulosa como recubrimiento . [En línea] Disponible en: [http://www.traquisa.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=18&lang=es](http://www.traquisa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=18&lang=es). Barcelona.

TRANSMERQUIM DE COLOMBIA S.A. 2016. Ficha de especificación técnica TM Solflex MP. Bogotá D.C : s.n., 2016.

TRANSMERQUIM DE COLOMBIA S.A. Ficha de especificación técnica etoxi-propanol . [En línea]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/e/ETOXI%20PROPANOL.pdf>.

TURTON, Richard. Analysis, synthesis and design of chemical processes. The Structure and Synthesis of Process Flow Diagrams. Tercera. Estados Unidos : Pearson Education, Inc, 2009. p. 71-80.

TUSSO PINZÓN, Ricardo Andrés y MARIÑO, Juan Carlos. Estudio para la recuperación de solventes de lavado de rodillos y mantillas en la planta de

manufactura de Legis S.A. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2008, p. 37.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Tipos de evaporadores. [En línea]. Disponible en: [http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina\\_06.htm](http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_06.htm).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. 2007. Hoja de seguridad XII etanol. [En línea]. Disponible en: <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/12etanol.pdf>.

WANKAT, Phillip C. Ingeniería de Procesos de Separación. Segunda edición. México D.F. : Pearson educación, 2008. p. 65-67.

WAQAS, Aleem y NURHAYATI, Mellon. Experimental study on the effect of parameters on sedimentation and coalescing profiles in liquid-liquid batch settler . s.l. : Procedia Engineering, 2016. p. 887-895. 148.

WINNACKER , karl y WEINGAERTNER, Ernest. Tecnología química. Tomo I. Barcelona : Gustavo Gili, 1949. p. 109-125

WYPYCH, George. Handbook of solvents. Toronto : Chemtec publishing, 2014. p 15-24.

YANDEN HEUVEL, W; GARDINER y HORNING, E.C. Characterization and Separation of Amines by Gas Chromatography. En: Analytical chemistry. Julio, 1964. vol. 36. no. 8; p. 1550–1560.

Y. ZEKI, Al-Saigh. Inverse gas chromatographic characterization of poly (ethylene oxide). En: Elsevier. Junio, 1999. vol. 40. no. 12; p. 3479-3485.

ZHANG, Zhuomin et al. Preparation of novel alumina nanowire solid-phase microextraction fiber coating for ultra-selective determination of volatile esters and alcohols from complicated food samples. En: Elsevier. Mayo, 2013. vol. 1290. p. 27-35.

ZIMMERMAN, William B; AL-MASHHADANI, Mahmood K.H y BANDULASENA, H.C. Hemaka. Evaporation dynamics of microbubbles. En: Chemical engineering science. Mayo, 2013, no. 101, p. 865-877.

# **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **FICHA TECNICA SOLVENTES (VER EN CD)**

## **ANEXO B**

### **CUADRO COMPARATIVO TÉCNICAS ANALÍTICAS (VER EN CD)**

**ANEXO C**

**PLAN DE MUESTREO (VER EN CD)**

## **ANEXO D**

### **PROTOCOLO CROMATOGRAFIA DE GASES (VER EN CD)**



## **ANEXO E**

### **CROMATROGRAFIA DE GASES DIAGNOSTICO (VER EN CD)**

## **ANEXO F**

### **CROMATROGRAFIA ACOPLADA ESPECTRO DE MASAS (VER EN CD)**

## **ANEXO G**

### **ANALISIS CONTENIDO DE SÓLIDOS (VER EN CD)**

## **ANEXO H**

### **ANALISIS HUMEDAD POR KARL FISHER (VER EN CD)**

**ANEXO I**

**MATRIZ DE SELECCIÓN (VER EN CD)**

**ANEXO J**

**PRUEBA DE DESTILACIÓN (VER EN CD)**

## **ANEXO K**

### **CROMATOGRÁFIA DE GASES FRACCIONES PRUEBA DE DESTILACIÓN (VER EN CD)**

**ANEXO L**

**SIMULACIÓN CHEMCAD (VER EN CD)**




## **ANEXO M**

### **MUESTRA DE CÁLCULOS DIMENSIONAMIENTO (VER EN CD)**

## **ANEXO N**

### **PLANOS UNIDAD DE PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE SOLVENTES (VER EN CD)**

**ANEXO O**  
**COTIZACIONES DE DESTILADORES (VER EN CD)**

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


## AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotras **Lizeth Catherine Arias Arias** y **María Alejandra Tamayo León** en calidad de titulares de la obra **Desarrollo de una propuesta de recuperación de residuos de solventes en la empresa Golden Flex S.A.**, elaborada en el año 2016, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: [http://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://co.creativecommons.org/?page_id=13)

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

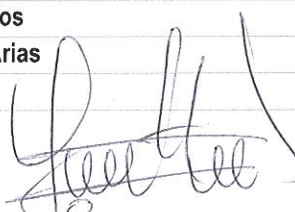
AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

<b>Información Confidencial:</b> este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 22 días del mes de agosto del año 2017.

#### LOS AUTORES:

##### Autor 1

Nombres	Apellidos
Lizeth Catherine	Arias Arias
Documento de identificación No	Firma
1.014.249.538	

##### Autor 2

Nombres	Apellidos
María Alejandra	Tamayo León
Documento de identificación No	Firma
1.052.399.020	